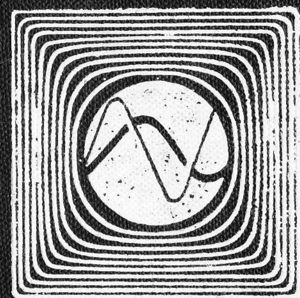
MEMORATORUL INGINERULUI ELECTRICIAN



Ing. Rotariu Victoria
Iași

SIEMENS

MEMORATORUL INGINERULUI ELECTRICIAN

Traducere din limba germană,
cu adaptări la condițiile din România

Editura tehnică
București



SIEMENS

FORMEL- UND TABELLENBUCH FÜR STARKSTROM-INGENIEURE

Herausgeber: Siemens Aktiengesellschaft, Berlin-München

Lucrarea originală a fost elaborată de un grup de specialişti ai întreprinderii Siemens

Dr. Fritz Aßmus	2.5.
Hans K. Berckmüller	7.1., 7.2., 7.5.–7.8.
Hans Busch	11.4.
Hans-Horst Caemmerer	9.1.
Josef Denzler	8.9.
Dr. Werner Dietrich	8.4.
Alfred Emig	13.1.
Gert Epha	8.3.
Dr. Manfred Erche	3.6., 3.7., 3.8.
Dr. Karl-H. Feist	8.3.
Hans Fruth	5.5.
Prof. Dr. Werner Gebauhr	2.2., 2.3.
Mrs. Dr. Gerda Giesecke	2.4.
Hans Glas	5.6.
Eduard Goerk	5.3.
Lothar Goryczka	9.4.
Hans-Christian Grassmann	11.3.
Paul Haak	5.4., (5.1., 5.2.)
Rolf Hahn	15.
Hermann Heiden	9.3.
Lothar Heinhold	8.7.
Hans Hoffmann	3.1.
Werner Hübner	1.2., 1.3.
Karl Heinz Ittmann	8.9.
Dieter Kämmerer	13.1.
Rudolf Kahnt	8.1.
Gerd Kettler	11.1.
Dr. Heinz Kimmel	7.3.
Otto v. Klewitz	4.
Othmar Kopriva	9.2.1.–9.2.4.
Werner Lehmann	8.2.3.
Dr. Gustav Leiner	1.1., 3.2.–3.5.
Prof. Dr. Wolfgang Liebe	7.4.
Karl Maaz	2.9.2.–2.9.4.
Prof. Dr. Otfried Madelung	2.1.
Wilhelm Mosch	11.2.
Kurt-Willy Mugele	13.3.

Dr. Karl-Heinz Neeb	2.2.
Dr. Hans Neumann	2.5., 4.
Dr. Rudolf Oetker	14.
Dr. Hans Pfister	2.11
Hermann Reizuch	8.6.
Heinz Rink	5.1., 5.2.
Richard Roeper	8.2.1., 8.2.2.
Dr. Wolfgang Rößner	11.4.
Hans-Martin Roth	13.2.
Walter Roth	16.2.
Dr. Eugen Sauter	2.2., 2.3., 5.5.
Gerd Schulz	8.9.
Wilhelm Schweizer	9.3.
Werner Seibert	10.1.–10.3.
Dr. Alfred Stoll	5.1., 5.2., 5.4.
Dr. Josef Tittel	6.
Prof. Dr. Ferdinand Trendelenburg	2.10.
Otto Völcker	9.2.5.
Siegfried Waller	7.5., 16.1.
Dr. Jürgen Weber	8.5.
Alfred Webs	8.8.2.
Dr. Erhard Weidlich	2.8., 12.
Dr. Herbert Weiß	2.9.1.
Theodor Wittenzellner	8.8.1., 10.4.
Dr. Theodor Wörner	2.6.
Kurt Wullschläger	1.2., 1.3., 4.

*
* *

Completările la ediția în limba română au fost elaborate de:

Dr. ing. Răzvan Măgureanu	6.1.–6.3., 7.2., 7.3.1.–7.3.3.
Ing. Emanoil Vârzaru	8.5.3., 8.5.4.5.–8.5.4.7.

Traducerea a fost efectuată de:

Ing. Victor Ioan Antonescu	3.2.–3.8.
Ing. Viorel Buta	4., 14.
Ing. Teodor David	8., 9.
Ing. Radu Dimitriu	5.
Sofia Encescu	1.,2.1.–2.4., 2.7., 3.1.
Dr. ing. Balazs Mathe	10.,11.1–11.3., 12., 13.
Ing. Friedrich Schattner	6., 7., 11.4., 2.1.–2.4.
Ing. Claudiu Tanasiciuc	15., 16.
Ing. Iacob Vaisman	2.5., 2.6., 2.8.–2.11.

Controlul științific și adaptarea ediției în limba română au fost efectuate de:

Ing. Hermina Albert	1., 3., 4., 8.1–8.7.
Ing. Grigore Brăileanu	14., 15., 16.
Ing. Petre Ciortan	10.
Ing. Dan Iosif	13.2.–13.3.
Ing. Aureliu Leca	5.
Ing. Gabriela Maltezeanu	12.
Ing. Dănilă Mark	2.1. – 2.4., 2.7.
Dr. ing. Răzvan Măgureanu	6., 7.
Conf. dr. ing. Viorel Micloși	11.4.
Ing. Constantin Petrescu	8.8.
Ing. Emil Pietrăreanu	8.9
Prof. ing. Cristina Popescu	2.5.-2.6.,2.8.-2.11.
Ing. Oscar Rosemberg	9.
Fiz. Dinu Savopol	13.1
Ing. Liviu Segal	10
Ing. Fănică Spinei	4.
Ing. Mauriciu Sufrim	8.3.
Ing. Valeriu Șerban	13.4.
Ing. Emanoil Vârzaru	8.5.
Ing. Lascăr Zamfirescu	11.1. – 11.3.

Recenzenți: ing. Diegis Hrincu
ing. Maria Lăzărescu
ing. Rodica Răzmeriță
ing. Mihai Stavrică
Redactor: ing. Paulina Dumitrescu
Tehnoredactor: Theodor Ivan
Coperta: Nicolae Nicolaev

PREFAȚĂ

Acest memorator al inginerului electrician reprezintă traducerea versiunii în limba engleză a ultimei ediții a lucrării „Manual de tabele și formule pentru inginerul de curenți tari", realizată de întreprinderea Siemens. Cele patru ediții apărute în limba germană s-au bucurat de o foarte bună apreciere din partea specialiștilor, astfel că la fiecare dintre acestea au fost necesare mai multe tiraje. Bazată pe aceste considerente, Editura tehnică a inițiat traducerea ultimei ediții a lucrării, cu speranța că aceasta se va bucura și în țara noastră de același succes.

Față de lucrarea originală, ediția în limba română prezintă unele adaptări, a căror necesitate a rezultat din dorința ca indicațiile de calcul și caracteristicile materialelor, echipamentelor și instalațiilor prezentate să fie puse de acord cu standardele, prescripțiile și normativele în vigoare în țara noastră. Astfel, în cap. 8, 9, 10 și 13 tabelele originale, conținînd caracteristici ale aparatelor și echipamentelor electrice fabricate de firma Siemens, au fost înlocuite cu caracteristicile produselor românești corespunzătoare. În cazul subcap. 8.8, datele cuprinse în standardele noastre neacoperind întregul domeniu al datelor din tabelele originale, ele au fost prezentate în paralel cu acestea. În cazul în care standardele noastre indică numai valorile limită admise pentru anumite caracteristici, s-au făcut doar trimiteri la standardele respective, menținîndu-se, cu titlu orientativ, și tabelele din lucrarea originală.

De asemenea, au fost aduse lucrării unele completări, în cazurile în care s-a considerat că definițiile, caracteristicile sau relațiile de calcul prezentate nu acopereau în măsura necesară domeniul respectiv. Astfel, în cap. 7 au fost adăugate două subcapitole privind caracteristicile mașinilor de curent continuu și ale mașinilor asincrone, iar în cap. 8 a fost dezvoltat subcapitolul privind mutatoarele, în cadrul căruia au fost prezentate datele referitoare la funcționarea, construcția și calculul tiristoarelor.

Toate modificările și completările efectuate față de lucrarea originală au fost evidențiate printr-o linie verticală pe marginea stîngă a paginii.

Memoratorul a fost adus la această formă, care sperăm a fi utilă cititorilor noștri, cu contribuția unui numeros colectiv de specialiști din producție, proiectare, cercetare și învățămînt, cărora le aducem și pe această cale mulțumirile noastre.

EDITURA TEHNICĂ

CUPRINS

Partea a treia

INSTALAȚII DE UTILIZARE A ENERGIEI ELECTRICE

Partea a patra

TEHNICA REGLĂRII AUTOMATE ȘI AUTOMATIZAREA

PARTEA ÎNTÎI

NOȚIUNI FUNDAMENTALE

1. UNITĂŢI DE MĂSURĂ

1.1. SISTEME DE UNITĂŢI DE MĂSURĂ

Atît timp cît s-au folosit numai ecuaţii cu valori numerice, prin sisteme de unităţi de măsură, se înţelegeau numai sisteme de unităţi. În ultimele patru decenii însă ne-am obişnuit să raţionăm cu mărimi fizice şi, — corespunzător regulii

mărimea este valoarea numerică înmulţită cu unitatea

să folosim ecuaţii cu mărimi ale căror unităţi sînt invariabile: în acest fel prin sisteme de unităţi de măsură se înţeleg acum *sisteme de mărimi şi de unităţi.*

Prin mărimi fizice se înţeleg proprietăţile măsurabile ale obiectelor, proceselor sau stărilor fizice[1]). O unitate este o anumită mărime aleasă convenţional dintr-un număr de mărimi de acelaşi fel. Sistemele de unităţi de măsură au la bază un număr de *unităţi fundamentale*[2]) independente între ele. Toate celelalte unităţi ale sistemului — *unităţi derivate* — pot fi deduse din aceste unităţi fundamentale.

Cea de a 10-a Conferinţă Generală Internaţională pentru măsuri şi greutăţi din 1954 a adoptat următoarele şase unităţi fundamentale:

1) pentru lungime, *metrul* (m);

2) pentru masă, *kilogramul* (kg);

3, pentru timp, *secunda* (s);

4) pentru curentul electric, *amperul* (A);

5) pentru temperatură, *gradul Kelvin* (K);

6) pentru intensitatea luminoasă, *candela* (cd).

Aceste şase unităţi fundamentale, formează, împreună cu unităţile derivate coerente (adică fără factori numerici suplimentari), „Sistemul Internaţional de unităţi" pe scurt „SI". Pe lîngă acest sistem, o perioadă de timp s-au folosit sistemul CGS (în domeniul fizicii) şi sistemul tehnic MKfS, amîndouă bazîndu-se pe cîte trei unităţi fundamentale:

---

[1]) De ex. distanţa, masa, temperatura.
Proprietatea esenţială a acestora este de a putea creşte sau descreşte.

[2]) Unităţile fundamentale corespund mărimilor fundamentale ale unui sistem de dimensiuni.

Sistemul de unități de măsură	Lungime	Masă	Timp	Forță	Curent electric
CGS	cm	g	s	u. derivată	u. derivată
MKfS	m	u. derivată 1)	s	kgf 2)	—
SI	m	kg	s	u. derivată	A

1) În sistemul tehnic de unități, unitatea derivată de măsură a masei, pentru care nu s-a stabilit o denumire, este de 9,80665 kg.
2) În limba germană kp (kilopond). Unitatea de forță în sistemul MKfS s-a considerat mult timp kilogramul, împotriva celor convenite la cea de a 3-a Conferință Generală de Unități și Măsuri din anul 1901. Kilopond-ul este unitatea de forță derivată din ecuația $F = m.a$ unde masa este în kg, iar accelerația în m/s^2. Libra (lb) este unitatea pentru greutate și masă utilizată în Anglia și S.U.A.

În timp ce în sistemele CGS și SI se consideră ca mărime fundamentală masa *(m)*, în sistemul MKfS se consideră ca mărime fundamentală forța (F). Notînd accelerația cu a, legea de bază a dinamicii — legea lui Newton — se exprimă prin $F = m \cdot a$. Rezultă definițiile:

în sistemul CGS: 1 dyn (dyna) este forța necesară pentru a imprima unui corp cu masa de 1 g o accelerație de 1 cm/s^2;

în sistemul MKfS: 1 kgf (kilogram-forță)[1] este forța necesară pentru a imprima unui corp cu masa 1 kg o accelerație egală cu valoarea standardizată pentru accelerația gravitațională, 9,80665 m/s^2;

în sistemul SI: 1 N (newton) este forța necesară pentru a imprima unui corp cu masa 1 kg accelerația de 1 m/s^2.

De aici rezultă relația dintre unități:

$$1\ \text{N} = 10^5\ \text{dyn} = 1/9{,}80665\ \text{kgf}.$$

În sistemul CGS, care se bazează numai pe cele trei mărimi fundamentale din mecanică, mărimile și unitățile electromagnetice s-au putut deduce numai introducînd cel puțin o ipoteză suplimentară. Unitățile electrostatice ale sistemului CGS s-au determinat presupunînd $\varepsilon_0 \equiv 1$, unitățile electromagnetice ale sistemului CGS presupunînd $\mu_0 \equiv 1$, iar unitățile sistemului simetric Gauss presupunînd $\varepsilon_0 \equiv 1$ și $\mu_0 \equiv 1$. În aceste trei sisteme, în care se obișnuia scrierea neraționalizată, mărimile mai sus amintite aveau dimensiuni diferite, adesea cu exponenți fracționari ai mărimilor fundamentale. Aceste dezavantaje au fost eliminate prin introducerea amperului — unitate de măsură a curentului electric — ca o a patra unitate fundamentală în sistemul electromagnetic de patru unități, care a fost adoptat la cea de a 9-a Conferință Generală pentru Măsuri și Greutăți din 1948. Cu această ocazie, corespunzător unei propuneri făcute de CEI (Comitetul Electrotehnic Internațional) s-a recomandat folosirea scrierii raționalizate. Unitățile electrice „internaționale" definite empiric s-au înlocuit în 1948 cu unități „absolute" care, prin intermediul forței de interacțiune dintre două conductoare paralele străbătute de curent, au fost cuprinse în unitățile mecanice, astfel încît este valabilă relația

$$1\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} = 1\ \text{W} = 1\ \text{Nm/s}.$$

1) În trecut unitatea de forță a sistemului tehnic de măsură MKfS s-a definit ca acea forță (kg-forță) cu care o greutate de 1 kg acționează asupra suportului său la o accelerație gravitațională standardizată $g_n = 9{,}80665$ m/s^2.

Între vechile unități internaționale și noile unități absolute folosite în prezent există relațiile:

$1\ V_{int} = 1{,}00034\ V_{abs}$; $\quad 1\ F_{int} = 0{,}99951\ F_{abs}$;

$1\ A_{int} = 0{,}99985\ A_{abs}$; $\quad 1\ C_{int} = 0{,}99985\ C_{abs}$;

$1\ \Omega_{int} = 1{,}00049\ \Omega_{abs}$; $\quad 1\ H_{int} = 1{,}00049\ H_{abs}$;

$1\ W_{int} = 1{,}00019\ W_{abs}$; $\quad 1\ J_{int} = 1{,}00019\ J_{abs}$.

Observație. În cuprinsul memoratorului, din motive practice, au trebuit să fie folosite adesea unități care se abat de la cele fundamentale. În asemenea cazuri, a fost explicată detaliat dependența dintre mărime și unitate. Dacă nu s-au dat explicații corespunzătoare, se va considera că s-au folosit exclusiv unități fundamentale și unități derivate din acestea[1].

1.2. UNITĂȚI ELECTRICE ȘI MAGNETICE

Tabelul 1.1. **Unități electrice și magnetice**

Mărimea	Simbolul	Unitate internațională (unitate SI)		Unități magnetice speciale		
		Denumire	Simbol	Denumire	Simbol	O unitate SI este egală cu [1]
Potențial, tensiune electrică, tensiune electromotoare	V, U, e	volt	V			
Curentul electric	I	amper	A			
Densitatea de curent electric	J		A/m^2			
Rezistența electrică	R	ohm	Ω = V/A			
Rezistivitate	ρ		Ω m			
Conductanță	G	siemens	S = A/V = = 1/Ω			
Conductivitate electrică	γ		S/m=1/Ωm			
Flux magnetic	Φ	weber	Wb = Vs	maxwell	Mx	10^8Mx
Inducție magnetică	B	tesla	T=Wb/m^2	gauss	Gs	10^4Gs
Tensiune magnetică	U_m	amper	A			

1) În România sînt valabile următoarele standarde privind unitățile de măsură:
STAS 737-62 Unități fundamentale ale sistemului internațional de unități de măsură SI.
737/8-68 Sistemul internațional de unități (SI). Mărimi electromagnetice. Unități de măsură.
7496-66 Unități suplimentare și derivate ale sistemului internațional de unități de măsură SI.
3087-67 Electrotehnica. Simboluri literale și semne convenționale.

Tabelul 1.1 (continuare)

Mărimea	Simbolul	Unitate internațională (unitate SI)		Unități magnetice speciale		
		Denumire	Simbol	Denumire	Simbol	O unitate SI este egală cu: [1]
Intensitatea cîmpului magnetic	H		A/m	oersted	Oe	$4\pi \cdot 10^{-3}$ Oe
Permeanța	Λ	henry	H = Wb/A			
Permeabilitatea absolută	μ		H/m	$\frac{\text{gauss}}{\text{oersted}}$	Gs/Oe	$\frac{10^7}{4\pi}$ Gs/Oe
Inductanță, inductanță mutuală	L, M	henry	H = Wb/A			
Tensiune magnetică, tensiune magnetomotoare, solenație	U_m, F_m, Θ	amper	A			
Sarcină electrică	Q, q	coulomb	C = As			
Inducție electrică	D		C/m²			
Intensitatea cîmpului electric	E		V/m			
Permitivitate (constanta dielectrică absolută)	ε		F/m			
Capacitatea electrică	C	farad	F = As/V			

[1]) Acești coeficienți de transformare sînt valabili numai în cazul cînd unitățile Mx, Gs și Oe se consideră a fi mărimi ale sistemului CGS electromagnetic de patru unități raționalizat.

Permitivitatea (constanta electrică, constanta dielectrică a vidului)

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} \approx 0{,}885419 \cdot 10^{-11}\ \text{F/m}.$$

Permeabilitatea vidului (constanta magnetică)

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{H/m} \approx 1{,}256637 \cdot 10^{-6}\ \text{H/m}.$$

Viteza de propagare a undelor electromagnetice în vid

$$c_0 \approx 2{,}997925 \cdot 10^8\ \text{m/s}.$$

Coeficienți de transformare

1 Ω cm = 10^4 Ω mm²/m;
1 A/in = 0,394 A/cm; 1 A/cm = 2,54 A/in;
1 Oe = 0,796 A/cm; 1 A/cm = 1,257 Oe;
= 2,02 A/in;
1 kGs = 6,452 kilolinii/in²
= 10^{-5} Vs/cm²;
1 V/mil = 39,4 V/mm;
1 W/lb = 2,21 W/kg; 1 W/kg = 0,454 W/lb.

1.3. COEFICIENȚI DE TRANSFORMARE

Tabelul 1.2. **Valorile prefixelor pentru multiplii și submultiplii unităților metrice (zecimale)**

T	tera	10^{12}	da	deca	10	n	nano	10^{-9}
G	giga	10^9	d	deci	10^{-1}	p	pico	10^{-12}
M	mega	10^6	c	centi	10^{-2}	f	femto	10^{-15}
k	kilo	10^3	m	mili	10^{-3}	a	atto	10^{-18}
h	hecto	10^2	μ	micro	10^{-6}			

Tabelul 1.3. **Unități de lungime**

1 in = 25,4 mm 1 yd = 0,9144 m

10 mm = 1 cm 10 dm = 1 m 10 dam = 1 hm
10 cm = 1 dm 10 m = 1 dam 10 hm = 1 km

	mm	cm	m	in	ft	yd
1 mm	1	0,1	0,001	0,039 3701	0,003 280 84	0,001 093 61
1 cm	10	1	0,01	0,393 701	0,032 808 4	0,010 936 1
1 m	1000	100	1	39,3701	3,280 84	1,093 61
1 in	25,4	2,54	0,0254	1	0,083 333	0,027 777 8
1 ft	304,8	30,48	0,3048	12	1	0,333 333
1 yd	914,4	91,44	0,9144	36	3	1

	m	km	ft	furlongs	milă	milă marină
1 m	1	0,001	3,280 84	0,004 970 97	0,000 621 37	0,000 539 61
1 km	1000	1	3 280,84	4,970 97	0,621 37	0,539 61
1 ft	0,3048	0,000 304 8	1	0,001 515 2	0,000 189 394	0,000 164 74
1 furlong	201,168	0,201 168	660	1	0,125	0,108 553
1 milă	1609,344	1,609 344	5280	8	1	0,868 42
1 milă marină	1853,18	1,853 18	6080	9,212 12	1,151 52	1

Tabelul 1.4. **Transformări de metri în yarzi şi invers**

m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	yd	yd	yd	yd	yd	yd	yd	yd	yd	yd
0	—	1,0936	2,1872	3,2808	4,3745	5,4681	6,5617	7,6553	8,7489	9,8425
10	10,9361	12,0297	13,1234	14,2170	15,3106	16,4042	17,4978	18,5914	19,6850	20,7786
20	21,8723	22,9659	24,0595	25,1531	26,2467	27,3403	28,4339	29,5276	30,6212	31,7148
30	32,8084	33,9020	34,9956	36,0892	37,1828	38,2765	39,3701	40,4637	41,5573	42,6509
40	43,7445	44,8381	45,9317	47,0254	48,1190	49,2126	50,3062	51,3998	52,4934	53,5871
50	54,6807	55,7743	56,8679	57,9615	59,0551	60,1487	61,2423	62,3360	63,4296	64,5232
60	65,6168	66,7104	67,8040	68,8976	69,9913	71,0849	72,1785	73,2721	74,3657	75,4593
70	76,5529	77,6465	78,7402	79,8338	80,9274	82,0210	83,1146	84,2082	85,3018	86,3955
80	87,4891	88,5827	89,6763	90,7699	91,8635	92,9571	94,0507	95,1444	96,2380	97,3316
90	98,4252	99,5188	100,612	101,706	102,800	103,893	104,987	106,080	107,174	108,268

yd	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0	—	0,9144	1,8288	2,7432	3,6576	4,5720	5,4864	6,4008	7,3152	8,2296
10	9,1440	10,0584	10,9728	11,8872	12,8016	13,7160	14,6304	15,5448	16,4592	17,3736
20	18,2880	19,2024	20,1168	21,0312	21,9456	22,8600	23,7744	24,6888	25,6032	26,5176
30	27,4320	28,3464	29,2608	30,1752	31,0896	32,0040	32,9184	33,8328	34,7472	35,6616
40	36,5760	37,4904	38,4048	39,3192	40,2336	42,1480	42,0624	42,9768	43,8912	44,8056
50	45,7200	46,6344	47,5488	48,4632	49,3776	50,2920	51,2064	52,1208	53,0352	53,9496
60	54,8640	55,7784	56,6928	57,6072	58,5216	59,4360	60,3504	61,2648	62,1792	63,0936
70	64,0080	64,9224	65,8368	66,7512	67,6656	68,5800	69,4944	70,4088	71,3232	72,2376
80	73,1520	74,0664	74,9808	75,8952	76,8096	77,7240	78,6384	79,5528	80,4672	81,3816
90	82,2960	83,2104	84,1248	85,0392	85,9536	86,8680	87,7824	88,6968	89,6112	90,5256

Tabelul 1.5. **Fracţiuni de ţoli (in), valoarea lor zecimală şi valoarea corespunzătoare în milimetri**

in	in	mm	in	in	mm	in	in	mm	in	in	mm
1/16	0,063	1,587	5/16	0,313	7,937	9/16	0,563	14,287	13/16	0,813	20,637
1/8	0,125	3,175	3/8	0,375	9,525	5/8	0,625	15,875	7/8	0,875	22,225
3/16	0,188	4,762	7/16	0,438	11,112	11/16	0,688	17,462	15/16	0,938	23,812
1/4	0,25	6,35	1/2	0,5	12,7	3/4	0,75	19,05	1/1	1	25,4

Tabelul 1.6. **Unităţi de măsură a unghiurilor**

1 radian = 57,29578°					Diferenţa pentru 0,001 rad = 3′26¼″							
	Grade în radiani	Minute în radiani	Secunde în radiani		Radiani în grade, minute şi secunde							
			″	rad	rad	°	′	″	rad	°	′	″
1	0,017453	0,000291	10	0,000048	0,01	—	34	23	0,1	5	43	46
2	0,034907	0,000582	20	0,000097	0,02	1	8	45	0,2	11	27	33
3	0,052360	0,000873	30	0,000145	0,03	1	43	8	0,3	17	11	19
4	0,069813	0,001164	40	0,000194	0,04	2	17	31	0,4	22	55	6
5	0,087266	0,001454	50	0,000242	0,05	2	51	53	0,5	28	38	52
6	0,104720	0,001745	60	0,000291	0,06	3	26	16	0,6	34	22	39
7	0,122173	0,002036			0,07	4	0	39	0,7	40	6	25
8	0,139626	0,002327			0,08	4	35	1	0,8	45	50	12
9	0,157080	0,002618			0,09	5	9	24	0,9	51	33	58
10	0,174533	0,002909			0,10	5	43	46	1,0	57	17	45

Tabelul 1.7. **Unităţi de suprafaţă**

1 milă pătrată = 640 acri = 258 999 ha.
1 acru = 4 rods = 10 chains pătraţi = 4840 yd^2.
1 chain pătrat = 16 perch pătraţi (rods pătraţi) = 484 yd^2 = 404,686 m^2
100 mm^2 = 1 cm^2 100 m^2 = 1 a (ar)
100 cm^2 = 1 dm^2 100 a = 1 ha
100 dm^2 = 1 m^2 100 ha = 1 km^2

	mm^2	cm^2	m^2	in^2	ft^2	yd^2
1 mm^2	1	0,01	0,000001	0,00155	0,0000107639	0,000001196
1 cm^2	100	1	0,0001	0,15500	0,00107639	0,0001196
1 m^2	1 000 000	10 000	1	1550	10,7639	1,19599
1 in^2	645,16	6,4516	0,00064516	1	0,0069444	0,000771605
1 ft^2	92 903	929,03	0,092903	144	1	0,111111
1 yd^2	836 127	8 361,27	0,836127	1296	9	1

	m^2	ha	yd^2	acri
1 m^2	1	0,0001	1,19599	0,000247105
1 ha	10 000	1	11 959,9	2,47105
1 yd^2	0,836127	0,0000836127	1	0,000206612
1 acru	4046,86	0,404686	4840	1

Circular mil (CM)	în^2	mm^2	Circular mil (CM)	in^2	mm^2
50 000	0,0393	25,3	550 000	0,4320	278,7
100 000	0,0785	50,7	600 000	0,4712	304,0
150 000	0,1178	76,0	650 000	0,5105	329,4
200 000	0,1571	101,3	700 000	0,5498	354,7
250 000	0,1963	126,7	750 000	0,5890	380,0
300 000	0,2356	152,0	800 000	0,6283	405,3
350 000	0,2749	177,3	850 000	0,6676	430,7
400 000	0,3142	202,7	900 000	0,7068	456,0
450 000	0,3534	228,0	950 000	0,7461	481,4
500 000	0,3927	253,4	1 000 000	0,7854	506,7

Tabelul 1.8. **Unităţi de volum şi de capacitate**

1 gallon britanic	= 277,42 in³ = 4,54596 l	1000 mm³ = 1 cm³ 1000 cm³ = 1 dm³
1 gallon S.U.A.	= 231,001 in³ = 3,78533 l	1000 dm³ = 1m³ 10 ml = 1 cl
1 l (1000 ml)	= 1000,028 cm³	10 cl = 1 dl
1 uncie de lichid	= 0,960754 uncii de lichid S.U.A.	10 dl = 1 l
1 drachmă de lichid	= 0,960754 drachme de lichid S.U.A.	100 l = 1 hl
1 minim	= 0,960754 minimi S.U.A.	1:0,960754 = 1,04085

	cm³	in³	Minim	Drachme de lichid	Uncii de lichid
1 cm³	1	0,061024	16,8936	0,281560	0,035195
1 in³	16,3871	1	276,837	4,6139	0,57674
1 minim	0,059194	0,0036122	1	0,0166667	0,00208333
1 drachmă de lichid	3,5516	0,216734	60	1	0,125
1 uncie de lichid	28,413	1,7339	480	8	1

	dm³	ft³	l	Pints	Quarţi	Galloni britanici
1 dm³	1	0,0353147	0,999972	1,75975	0,87988	0,219969
1 ft³	28,3169	1	28,3161	49,831	24,9153	6,2288
1 l	1,000028	0,0353156	1	1,75980	0,87990	0,219975
1 pint	0,56826	0,020068	0,56825	1	0,5	0,125
1 quart	1,13652	0,040136	1,13649	2	1	0,25
1 gallon britanic	4,54609	0,160544	4,54596	8	4	1

	m³	yd³	Galloni SUA	Galloni britanici	Acru-picioare
1 m³	1	1,30795	264,17	219,969	0,00081071
1 yd³	0,76455	1	201,974	168,178	0,000619834
1 gallon S.U.A.	0,0037854	0,0049511	1	0,83267	0,0000030689
1 gallon britanic	0,0045461	0,0059461	1,20095	1	0,0000036856
1 acru-picior	1233,48	1613,33	325 848,41	271 327,36	1

Tabelul 1.9. **Unităţi de forţă şi masă**

1 lb [1] (av)[3]	= 16 uncii [1] (av) = 7000 grains = 0,45359237 kg.
1 lb [2] (tr) [4]	= 12 uncii [2] (tr) = 5760 grains (unităţi S.U.A)
1000 kg	= 10 quintale = 1 t (metrică)
1 lbf	= 0,45359237 kgf = 32,1740 poundali = **4,44822 N.**
1 dyn	= 10^{-5} N.
1 kgf	= 980 665 dyn = 9,80665 N = 70,9316 poundali
1 N	= 10^5 dyn = 1 kg m/s² = 0,224809 pound-forţă = 7,23301 poundali = 0,101972 kgf
1 poundal	= 1 lb ft/s² = 0,0140981 kgf = 0,0310810 lbf = 0,138255 N

	g	grains	drachme	uncii(tr)	uncii(av)	carate metrice
1 g	1	15,4324	0,257206	0,0321507	0,035274	5
1 grain	0,064799	1	0,0166667	0,00208333	0,0022857	0,323995
1 drachmă	3,88794	60	1	0,125	0,137143	19,4397
1 uncie (tr)	31,1035	480	8	1	1,09714	155,517
1 uncie (av)	28,3495	437,5	7,2917	0,91146	1	141,748
1 carat metric	0,2	3,08647	0,05144112	0,00643015	0,00705479	1

	kg	lb [2](tr)	lb [1](av)	quarters
1 kg	1	2,67923	2,20462	0,07874
1 lb [2] (tr)	0,373242	1	0,82286	0,02939
1 lb [1] (av)	0,453592	1,21528	1	0,03571
1 quarter	12,7006	34,0278	28	1

	t (metrice)	chintale	t lungă	t scurte
1 t (metrică)	1	19,6841	0,98421	1,10231
1 chintal	0,050802	1	0,05	0,056
1 t lungă	1,01605	20	1	1,12
1 t scurtă	0,90718	17,8571	0,89286	1

[1]) Unitate comercială
[2]) Unitate de giuvaergie
[3]) av reprezintă prescurtarea de la avoir du pois
[4]) tr reprezintă prescurtarea de la troy

Tabelul 1.10. **Unităţi de presiune şi eforturi**

1000,028 cm³ de apă distilată la 4°C şi 760 mm Hg au o masă de 1 kg. Densitatea mercurului la 0°C este 13,5951 g/cm³

	kgf/mm²	kgf/cm²	tf/cm²
1 kgf/mm²	1	100	0,1
1 kgf/cm²	0,01	1	0,001
1 tf/cm²	10	1000	1
1 lbf/in²	0,00070307	0,070307	0,000070307
1 tf/in²	1,574 88	157,488	0,157 488
1 tf/ft²	0,0109366	1,09366	0,00109366

	lbf/in²	tf/in²	tf/ft²
1 kgf/mm²	1 422,33	0,63497	91,436
1 kgf/cm²	14,2233	0,0063497	0,91436
1 tf/cm²	14 223,3	6,3497	914,36
1 lbf/in²	1	0,000446429	0,064286
1 tf/in²	2 240	1	144
1 tf/ft²	15,5556	0,0069444	1

	kgf/cm²	lb/in²	m H_2O	ft H_2O	mm Hg(torr)	in Hg
1 kgf/cm²	1	14,2233	10,00028	32,8093	735,559	28,9599
1 lbf/in²	0,070307	1	0,70309	2,3067	51,715	2,0360
1 m H_2O	0,099997	1,4223	1	3,28084	73,554	2,8958
1 ft H_2O	0,030479	0,43352	0,3048	1	22,419	0,88065
1 mm Hg (1 torr)	0,0013595	0,019337	0,013596	0,044605	1	0,03937
1 in Hg	0,034532	0,49115	0,34532	1,1330	25,4	1

Notă: Valorile sînt pentru coloana de apă la 4°C; pentru coloana de mercur la 0°C
1 bar = 1 Mdyn/cm² = 10^5 N/m²
1 μ bar = 1 dyn/cm²

Tabelul 1.10 (continuare)

	Atmosferă tehnică	lb f/in²	Atmosferă fizică	Bar[1])	mm Hg[2])
1 atmosferă tehnică (at)	1	14,2233	0,96784	0,98066	735,56
1 lb f/in²	0,070307	1	0,068046	0,068948	51,715
1 atmosferă fizică (atm)	1,0332	14,696	1	1,0132	760
1 bar	1,01972	14,504	0,98693	1	750,06
10^3 mm Hg	1,3595	19,337	1,3158	1,3332	1000

[1]) În calculul echivalenţilor s-a folosit pentru acceleraţia gravitaţională valoarea internaţională standard 980,665 cm/s² (32,1740 ft/s²). Aceasta este valoarea adoptată de Comisia internaţională de măsuri şi greutăţi. Comitetul internaţional de metrologie foloseşte valoarea de 980,62 cm/s².

[2]) Valorile corespund pentru coloana de mercur la 0°C.

Pentru valoarea acceleraţiei gravitaţionale de la meridianul de la Greenwich de 32,1906 ft/s² (981,17 cm/s²), valorile echivalente în bar sînt:

Atmosferă fizică	Atmosferă tehnică	lb f/in²	Bar	mm Hg
0,98642	1,01919	14,496	1	749,68

Echivalenţi: 1 atmosferă fizică = 1,0138 bar; 1 lb f/in² = 0,068983 bar

1 atmosferă tehnică = 0,98117 bar; 1000 mm Hg = 1,3339 bar

Tabelul 1.11. **Formule pentru calculul temperaturilor**

	T, K	θ, °C[1])	t, °F	r, °R
Grade Kelvin K	T	$\theta + 273,15$	$\frac{5}{9}(t + 459,67)$	$\frac{5}{9} r$
Grade Celsius °C	$T - 273,15$	θ	$\frac{5}{9}(t - 32)$	$\frac{5}{9}(r - 491,67)$
Grade Fahrenheit °F	$\frac{9}{5} T - 459,67$	$\frac{9}{5} \theta + 32$	t	$r - 459,67$
Grade Rankine °R	$\frac{9}{5} T$	$\frac{9}{5} \theta + 491,67$	$t + 459,67$	r

1) Denumite anterior centigrade.

Tabelul 1.12. **Viteza (liniară)**

1 in = 25,4 mm

	milă/h	ft/s	cm/s	km/h
1 milă/h	1	1,46667	44,704	1,609344
1 ft/s	0,681818	1	30,48	1,09728
1 cm/s	0,0223694	0,328084	1	0,036
1 km/h	0,621371	0,911344	27,7778	1

Tabelul 1.13. **Densitatea**

1 in = 25,4 mm 1 lb = 0,453 592 37 kg

	t/m³ [1])	lb (av)/in³	lb (av)/ft³	chintale/yd³ (englezeşti)
1 t/m³	1	0,0361273	62,428	15,0496
1 lb (av)/in³...........	27,6799	1	1728	416,571
1 lb (av)/ft³	0,0160185	0,00057870	1	0,241071
1 chintal englez/yd³....	0,066447	0,00240055	4,14815	1

1) Tone pe metru cub are aceiaşi valoare cu kilograme pe centimetru cub şi de asemenea cu gram pe centimetrul cub; 1 t/m³ = 10 chintale/m³.

Tabelul 1.14. **Unităţi de concentraţie**

1 in = 25,4 mm
7000 grains = 1 lb = 453,59237 g
1 gallon britanic (gallon br) = 277,42 in³ = 4,54596 l

	g/l	uncii (av)/gallon britanic (UK)	lb (av)/ft³
1 g/l............................	1	0,160354	0,0624262
1 uncie (av)/gallon britanic (UK)	6,23620	1	0,389301
1 lb (av)/ft³	16,0189	2,56870	1

	g/m³	părţi la 100 000[1])	grains pe gallon britanic (UK)	grains/ft³
1 g/m³	1	0,100003	0,0701568	0,437
1 parte la 100 000	9,9997	1	0,70155	4,3698
1 grain/gallon britanic (UK)	14,2538	1,4254	1	6,22884
1 grain/ft³	2,28835	0,22884	0,160544	1

1) Interpretat ca centigrame pe litru (cg/l). Coloanele 1 şi 4 pot fi folosite de asemenea şi pentru umiditatea absolută.

Tabelul 1.15. **Momentul forţei** [1])

1 in = 25,4 mm 1 lbf = 0,45359237 kgf

	kgf · m	tf · m	lbf · in
1 kgf m	1	0,001	86,7962
1 tf m	1000	1	86 796,2
1 lbf in	0,0115212	0,0000115212	1
1 lbf. ft	0,138255	0,000138255	12
1 tf in	25,8076	0,0258076	2 240
1 tf ft	309,691	0,309691	26 880

	lbf·ft	tf · in	tf · ft
1 kgf m	7,23301	0,0387483	0,00322902
1 tf m	7233,01	38,7483	3,22902
1 lbf in	0,0833333	0,00044643	0,0000372024
1 lbf. ft	1	0,0053571	0,00044643
1 tf in	186,667	1	0,083333
1 tf ft	2240	12	1

1) Acest tabel se poate folosi şi pentru transformarea unităţilor de energie.

Tabelul 1.16. **Unităţi de lucru mecanic, căldură şi energie**

Tabelul se referă la caloria din tabelele de abur (revizuite) şi la Unitatea Termică Britanică (BTU) din tabelele de abur (revizuite); tabelul este calculat cu factorii de transformare 1 in = 2,54 cm şi 1 lbf = = 0,45359237 kgf.

1 eV = $1,63 \cdot 10^{-20}$ kgf. m = $4,44 \cdot 10^{-26}$ kWh.
= $3,82 \cdot 10^{-23}$ kcal = $1,517 \cdot 10^{-22}$ BTU (unităţi termice britanice)
1 erg = 1 dyn. cm = 10^{-7} J

	kgf m	kWh	kJ	kcal	Unităţi Termice Britanice (BTU)	CPh
10^6 kgf·m	1 000 000	2,72407	9 806,65	2342,28	9 294,91	3,65304
1 kWh	367 098	1	3 600	859,845	3 412,14	1,34102
10^3 kJ	101 972	0,277778	1 000	238,846	947,817	0,372506
10^3 kcal	426 935	1,1630	4 186,8	1000	3 968,32	1,55961
10^3 Unităţi Termice Britanice	107 586	0,293071	1 055,06	251,996	1 000	0,393015
1 CPh	273 745	0,745700	2 684,52	641,187	2 544,43	1

	MJ	kWh	CPh	10^6ft · lbf	10^6 poundali · ft	10^6 kgf · m
1 MJ	1	0,277778	0,372506	0,737562	23,7304	0,101972
1 kWh	3,6	1	1,34102	2,65522	85,4293	0,367098
1 CPh	2,68452	0,745700	1	1,98000	63,7046	0,273745
10^6 ft. lbf	1,35582	0,376616	0,505051	1	32,1740	0,138255
10^6 ft · poundali [1])	0,0421501	0,0117056	0,0156974	0,031081	1	0,004297
10^6 kgf · m	9,80665	2,72407	3,65304	7,23301	232,715	1

Diferite unităţi termice şi de uz general.
1 Unitate Termică Britanică/lb = 5/9 kcal/kg.
1 in = 25,4 mm.
1 lb = 0,45359237 kg.
1 gallon britanic = 4,5459631 l.

[1]) 1 poundal = 1 lb · ft/s^2.

Tabelul 1.17. **Unităţi de putere**

1 in = 25,4 mm
1 W = 10^7 erg/s = 0,238846 cal/s
1 lbf = 0,45359237 kgf
1 cal/s = 4,1868 W

	kW		CP metrici	CP	ft · lbf/s
	Greenwich[1])	Lat. 45°N. [2])			
1 kW (Greenwich)	1	—	1,35892	1,34033	737,18
1 kW (lat. 45°N.)	—	1	1,35962	1,34102	737,56
1 CP (metric[3])	0,73588	0,73550	1	0,98632	542,48
1 CP	0,74608	0,74570	1,01387	1	550
1 ft. lbf/s	0,00135652	0,00135582	0,00184340	0,00181818	1

[1]) Acceleraţia gravitaţiei = 32,1906 ft/s^2 (981,17 cm/s^2).
[2]) Valoarea internaţională standard a acceleraţiei gravitaţiei, la nivelul mării, 980,665 cm/s^2 (32,1740 ft/s^2).
[3]) Alte denumiri pentru această unitate sînt „cheval vapeur“ (75 kgf m/s) sau Pferdestärke

Tabelul 1.18. **Flux de căldură**

	cal/cm²s	kcal/m²h	W/cm²	Btu/ft²h
1 cal/cm²s	1	36 000	4,1868	13 272,1
10^3 kcal/m²h	0,0277778	1 000	0,1163	368,669
1 W/cm²	0,239	8 600	1	3 169
10^3 Btu/ft² h	0,075346	2 712,46	0,316	1 000

Tabelul 1.19. **Transport de căldură**

	cal/cm² s °C	kcal/m² h °C	W/cm² °C	Btu/ft² h °F
1 cal/cm² s °C	1	36 000	4,1868	7 373,4
10^3 kcal/m² h°C	0,0277778	1 000	0,1163	204,816
1 W/cm² °C	0,239	8 600	1	1 761
10^3 Btu/ft²h °F	0,135623	4 882,43	0,568	1 000

Tabelul 1.20. **Conductivitate termică**

	cal/cm s °C	kcal/m h °C	W/cm °C	Btu in/ft² h °F
1 cal/cm s °C	1	360	4,1868	2 902,91
10^3 kcal/m h °C	2,77778	1 000	11,63	8 063,6
1 W/cm °C	0,238846	85,9845	1	693
10^3 Btu in/ft² h °F	0,344482	124,014	1,44228	1 000

Tabelul. 1.21. **Unităţi fotometrice internaţionale şi germane**

Luminanţă	sb	cd/m²	asb	Footlambert	Lambert	Mililambert
1 sb	1	10 000	31 400	2919	3,142	3 142
1 cd/m²	0,0001	1	3,14	0,2919	0,00031	0,314
1 asb	0,000032	0,3184	1	0,093	0,0001	0,1
1 footlambert	0,00034	3,4	10,76	1	0,00108	1,076
1 lambert	0,3183	3 183	10 000	929	1	1 000
1 mililambert	0,00032	3,183	10	0,929	0,001	1
Iluminare	1 lx = 0,0929 ft · cd 1 ft · cd = 10,76 lx					

Tabelul. 1.22. **Moment de girație**

Momentul de girație este definit în sistemul de unități engleze prin expresia Wk^2 în lbf ft², și în sistemul de unități germane prin GD^2 în kgf m².

Aceste transformări constituie adesea o sursă de erori deoarece este necesar nu numai să se treacă de la un sistem de unități la altul, ci să se țină seama și de diferența dintre definiții. De remarcat că:

Momentul de inerție în unități metrice este:

$$J = mk^2 = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4}$$

sau în unități engleze

$$J = mk^2 = \frac{W}{g} k^2$$

Simbolurile folosite:

J = moment de inerție, în kg m² sau lb ft²;
m = masa, în kg sau lb;
k = raza de inerție, în m sau ft;
D = 2 k, în m sau ft;
G = greutatea în kgf;
W = greutatea, în lbf;
g = accelerația gravitațională, în ms^{-2} sau ft s^{-2}.

De aici $\frac{GD^2}{4}$ (definiția germană) este egal cu momentul de girație Wk^2 (definiția engleză).

În acest caz este valabil: 1 kgf m² = 2,2 lbf. $3,28^2$ ft² = 23,7 lb ft².

Ținînd seama de diferența dintre definiții, dacă $GD^2 = x$ kgf m², se obține:

$$Wk^2 = \frac{23,7}{4} x \text{ lbf ft}^2 = 5,9x \text{ lbf ft}^2 \approx 6x \text{ lbf ft}^2.$$

Dacă de exemplu GD^2 = 10 000 kgf m² vom avea Wk^2 = 59 000 lbf ft².

Din această cauză este greșit a se exprima

GD^2 în lbf ft² sau Wk^2 în kgf m²,

deoarece nu reiese clar dacă s-a ținut seama de diferența dintre cele două definiții.

De la GD^2 în kgf m², la Wk^2 în lbf ft²

kgf m²	0 lbf ft²	1 lbf ft²	2 lbf ft²	3 lbf ft²	4 lbf ft²	5 lbf ft²	6 lbf ft²	7 lbf ft²	8 lbf ft²	9 lbf ft²
0	—	5,9	11,8	17,7	23,6	29,5	35,4	41,3	47,2	53,1
10	59	64,9	70,8	76,7	82,6	88,5	94,4	100	106	112
20	118	124	130	136	142	148	153	159	165	171
30	177	183	189	195	201	207	212	218	224	230
40	236	242	248	254	260	266	271	277	283	289
50	295	301	307	313	319	325	330	336	342	348
60	354	360	366	372	378	384	389	395	401	407
70	413	419	425	431	437	443	448	454	460	466
80	472	478	484	490	496	502	507	513	519	525
90	531	537	543	549	555	561	566	572	578	584

De la Wk^2 în lbf ft², la GD^2 în kgf m²

lbf ft²	0 kgf m²	1 kgf m²	2 kgf m²	3 kgf m²	4 kgf m²	5 kgf m²	6 kgf m²	7 kgf m²	8 kgf m²	9 kgf m²
0	—	0,169	0,338	0,507	0,676	0,845	1,01	1,18	1,35	1,52
10	1,69	1,86	2,03	2,20	2,37	2,54	2,70	2,87	3,04	3,21
20	3,38	3,55	3,72	3,89	4,06	4,23	4,39	4,56	4,73	4,90
30	5,07	5,24	5,41	5,58	5,75	5,92	6,08	6,25	6,42	6,59
40	6,76	6,93	7,10	7,27	7,44	7,61	7,77	7,94	8,11	8,28
50	8,45	8,62	8,79	8,96	9,13	9,30	9,46	9,63	9,80	9,97
60	10,1	10,3	10,5	10,6	10,8	11,0	11,2	11,3	11,5	11,7
70	11,8	12,0	12,2	12,3	12,5	12,7	12,8	13,0	13,2	13,4
80	13,5	13,7	13,9	14,0	14,2	14,4	14,5	14,7	14,9	15,0
90	15,2	15,4	15,5	15,7	15,9	16,1	16,2	16,4	16,6	16,7

Cei mai importanți coeficienți de transformare [1])

acre[2] (acru) (—) [3])
0,404686 ha
4046,86 m²
4840 yd²

acre foot
(acru picior)
(acre ft)
1233,48 m³
271 327,36 UKgal
325 848,41 USgal
1 613,33 yd³

apostilb (asb)
0,3184 cd/m²
0,093 ft L
0,0001 L
0,000032 sb

atmosferă fizică
(atm)
1,0332 at
1,0132 bar
1,0138 bar
(Greenwich)
14,696 lbf/in²
760 mmHg

atmosferă tehnică (at)
0,967 84 atm
0,98066 bar
0,98117 bar
(Greenwich)
14,2233 lbf/in²
735,56 mmHg

bar (Greenwich) (—)
1,01919 at
0,98642 atm
14,496 lbf/in²
749,68 mmHg

bar (gravitație Standard) (—)
1,01972 at
0,98693 atm
14,504 lbf/in²
750,06 mmHg
10^6 dyn/cm²

Britsh thermal unit (Btu)
0,000393015 hp h
0,251996 kcal
107,586 kgf m
1,05506 kJ

candelă pe metru pătrat
(cd/m²)
3,14 asb
0,2919 ft L
0,00031 L
0,0001 sb

carat, metric (—)
3,08647 gr
200 mg

centimetru (cm)
0,0328084 ft
0,393701 in
0,01 m
10 mm
0,0109361 yd

centimetru pătrat (cm²)
0,00107639 ft²
0,155 in²
0,0001 m²
100 mm²
0,0001196 yd²

centimetru cub
(cm³)
0,061 024 in³
0,281 560 UK
drahme lichide
0,035 195 UK fl oz
16,8936 UK minims

chain (—)
0,1 furlong
100 links
20,12 m
4 rods
22 yd

circular mil (CM)
0,0785 × 10^{-5} in²
50,7 × 10^{-5} mm²

cubic foot
(picior cub) (ft³)
28,3169 dm³
28,3161 l
0,0283169 m³
6,2238 UKgal
49,831 UKpt
24,9153 UKqt

cubic inch
(inch cub) (in³)
16,3871 cm³
4,6139 UK fluid
drachms
0,57674 UK fl oz
276,837 UK minims

cubic yard
(yard cub) (yd)³
0,000619834 acre ft
0,76455 m³

---

1) Pentru unitățile engleze s-au dat în paranteze denumirile care sînt cunoscute, în general, în R.S.R.

2) Pentru recalcularea acrilor în hectare se înlocuiește un acru cu 0,40468 ha; de exemplu 377 acri = = 377 · 0,40468 ha.

3) (—) înseamnă că pentru aceste unități nu există simboluri.

168,178 UKgal
201,974 USgal

decimetru cub
(dm^3)
0,0353147 ft^3
0,999972 l
0,219969 UKgal
1,75975 UKpt
0,87988 UKqt

drachm (drahmă) (—)
3,88794 g
60 gr
0,137143 oz
0,125 oz tr

dynă (dyn) 10^{-5} N

electronvolt (eV)
1,517 × 10^{-22} Btu
3,82 × 10^{-23} kcal
1,63 × 10^{-20} kgf m
4,44 × 10^{-26} kWh

erg (erg)
1 dyn cm 10^{-7} J

fluid drachm
(drahmă lichide)
(UK fl drachm)
3,5516 cm^3
0,216 734 in^3
0,125 UK fl oz
60 UK minims

fluid ounce (uncie lichide) (UK fl oz)
28,413 cm^3
1,7339 in^3
8 UK fluid drachms
480 UK minims

foot (picior) (ft)
30,48 cm
0,0015152 furlong
12 in
0,3048 m
0,333333 yd

footlamber (ft L)
10,76 asb
3,4 cd/m^2
0,00108 L
0,000 34 sb

furlong (—)
660 ft
201,168 m
0,125 mile
0,108553 UK nautical mile

gallon (UKgal)
4,54609 dm^3
0,160544 ft^3
4,54596 l
0,0045461 m^3
8 UKpt
4 UKqt
1,20095 USgal
0,0059461 yd^3

gallon (USgal)
0,0037854 m^3
0,83267 UKgal
0,0049511 yd^3

grain (gr)
0,323995 carat
0,0166667 drachm
64,799 mg
0,0022857 oz
0,00208333 oz tr

gram (g)
0,257206 drachm
15,4324 gr
0,035274 oz
0,0321507 oz tr

head of water in feet
(picioare coloană de apă)
(ftH_2O)
0,88065 inHg
0,030479 kgf/cm^2
0,433 52 lbf/in^2
22,419 mmHg

head of water in metres
(metri coloană de apă)
(m H_2O)
2,8958 inHg
0,099997 kgf/cm^2
1,4223 lbf/in^2
73,554 mmHg

hectar (ha)
2,47105 acri
10 000 m^2
11 959,9 yd^2

horsepower (cal putere) (hp)
550 lbf ft/s
0,74608 kW (Greenwich)
0,74570 kW (Lat. 45°N)
1,01387 metric horsepower (CP)

horsepower, metric
(cal putere, metric) (CP)
0,986 32 hp
542,48 lbf ft/s
0,735 88 kW (Greenwich)
0,735 50 kW (Lat. 45°N)

horsepower hour (cal putere oră) (hp h)
2544,43 Btu
1,98 × 10^6 ft lbf
63,7046 × 10^6 ft pdl
641,187 kcal
273 745 kgf m
2 684,52 kJ
0,7457 kWh

hundredweight (cwt)
0,056 sh tn
0,050 802 t
0,05 ton

inch (în)
2,54 cm
0,083333 ft
0,0277778 yd

inch of mercury
(inch coloană de mercur)
(in Hg)
1,1330 ft H_2O
0,34532 m H_2O
0,49115 lbf/in^2
25,4 mmHg

kilocalorie (kcal)
3,968 32 Btu
0,001559 61 hp h
4,1868 kJ
0,001163 kWh
426,935 kgf m

kilogram (kg)
2,20462 lb
2,67923 lb tr

kilogram-forţă (kgf)
980 665 dyn
9,80665 N
70,9316 pdl

kilogram-forţă metru (kgf m)
0,00929491 Btu
2,34228 cal
7,23301 ft lbf
232,715 ft pdl
3,65304 × 10^{-6} hp h
9,80665 J
2,72407 × 10^{-6} kWh

kilojoule (kJ)
0,947 817 Btu
0,000 372 506 hp h
0,238846 kcal
0,000277778 kWh
101,972 kgf m

kilometru (km)
3280,84 ft
4,97097 furlongs
1000 m
0,62137 mile
0,539 UK nautical mile

kilometru pătrat (km^2)
0,386102 square mile

kilowatt (—) (Greenwich)
737,18 ft lbf/s
1,34033 hp
1,35892 CP

kilowatt (kW) (Lat. 45°N)
737,56 ft lbf/s
1,341 02 hp
1,35962 CP

kilowatt-oră (kWh)
3412,14 Btu
2,65522 × 10^6 ft lbf
85,4293 × 10^6 ft pdl
1,341 02 hp h
859,845 kcal
367 098 kgf m
3 600 kJ

lambert (L)
10 000 asb
3 183 cd/m^2
929 ft L
0,3183 sb

litru (l)
1,000028 dm^3
0,0353156 ft^3
0,219975 UKgal
1,75980 UKpt
0,87990 UKqt

metru (m)
100 cm
3,28084 ft
0,004970 97 furlong
39,3701 in
0,001 km
0,00062137 mile
0,00053961 UK nautical mile
1,09361 yd

metru pătrat (m^2)
0,000247105 acre
10 000 cm^2
10,7639 ft^2
0,0001 ha
1550 in^2
1,19599 yd^2

metru cub (m^3)
0,00081071 acre ft
35,3147 ft^3
219,969 UKgal
264,17 USgal
1,30795 yd^3

mile, nautical (—)
(UK nautical mile)
(milă marină engleză
6 080 ft
9,21212 furlongs
1,85318 km
1,15152 miles
2 026,66 yd

mile, statute (mile)
5 280 ft
8 furlongs
1,609344 km
0,86842 UK nautical mile
1760 yd

milimetru pătrat (mm^2)
0,01 cm^2
0,00155 in^2

milimetru coloană de mercur (mm Hg)
0,0013158 atm
0,0013332 bar
0,044605 ft H_2O
0,013596 m H_2O
0,03937 inHg
0,0013595 kgf/cm^2
2,78450 lbf/ft^2
0,019337 lbf/in^2

minim (—)
(UK minim)
0,059194 cm^3
0,0036122 in^3
0,0166667 UK fluid drachm
0,00208333 UK fl oz

newton (N)
0,224809 lbf
7,23301 pdl
0,101972 kgf
10^5 dyn

ounce avoir du pois (oz)
141,748 carat
7,2917 drachms
28,3495 g
437,5 gr
0,911 46 oz tr

ounce troy (oz tr)
155,517 carat
8 drachms
31,1035 g
480 gr
1,09714 oz

pint (UK pt)
0,56826 dm^3
0,020068 ft^3
34,6774 in^3
0,56825 l
0,125 UKgal
0,5 UKqt

pound (libră) avoir du pois (lb)
8,92857 × 10^{-3} cwt
0,453592 37 kg
1,21528 lb tr
0,0005 sh tn
4,464 29 × 10^{-4} ton

pound troy (lb tr)
0,373 242 kg
0,822 86 lb

pound-force (lbf)
0,45359237 kgf
32,1740 pdl
4,44822 N

pound-force per square inch (lbf/in^2)
0,068046 atm
0,068948 bar
2,3067 ft H_2O
0,70309 m H_2O
2,03602 in Hg
0,070307 kgf/cm^2
51,715 mm Hg
0,064286 $tonf/ft^2$

poundal (pdl)
0,0140981 kgf
0,0310810 lbf
0,138255 N

quart (UK qt)
1,13652 dm^3
0,040136 ft^3
1,13649 l
0,25 UKgal
2 UKpt

short ton (sh tn)
17,8571 cwt
2 000 lb
0,90718 t
0,89286 ton

square foot (picior pătrat) (ft^2)
929,03 cm^2
144 in^2
0,092903 m^2
92,903 mm^2
0,111111 yd^2

square inch (inch pătrat) (in^2)
6,4516 cm^2
0,0069444 ft^2
0,00064516 m^2
645,16 mm^2
0,00077160 yd^2

square mile (milă pătrată) (sq mile)
2,58999 km^2

square yard (yard pătrat) (yd^2)
0,000206612 acre
8361,3 cm^2
9 ft^2
1296 in^2
0,83613 m^2

stilb (sb)
31 400 asb
10 000 cd/m^2
2919 ft L
3,142 L

tonă metrică (t)
19,6841 cwt
2 204,62 lb
1,10231 sh tn
0,984207 ton

tonă pe oră (t/h)
0,61240 lb/s

tonă forţă pe metru pătrat (tf/m^2)
0,091436 $tonf/ft^2$

ton (—)
20 cwt
2 240 lb
1,12 sh tn
1,01605 t

ton-force per square inch ($tonf/in^2$)
157,488 kgf/cm^2
0,157488 t/cm^2
144 $tonf/ft^2$

yard (yd)
91,44 cm
3 ft
36 in
0,9144 m

watt (W)
10^7 erg/s
0,101972 kgf m/s
0,238846 cal/s
0,859845 kcal/h

2. PROPRIETĂŢILE MATERIALELOR

2.1. STRUCTURA MATERIEI

Componenţii de bază ai materiei sînt: *protonul*, *neutronul* şi *electronul*. Pe lîngă aceştea există încă circa o sută de alte *particule subatomice*, în general instabile, care în scurt timp după producerea lor în procese nucleare se dezintegrează. În prezent se evită denumirea de *particule elementare* folosită deseori în trecut. Toate aceste particule se caracterizează prin patru însuşiri principale: sarcină electrică, masă de repaus, spin (moment cinetic propriu) şi moment magnetic. Pe lîngă aceste însuşiri principale, particulele se deosebesc şi prin alte proprietăţi ca spin izotopic, hipersarcină, paritate etc.

Însuşirile principale sînt date în tabelul 2.1. Aproape tuturor particulelor subatomice le sînt asociate antiparticule. Particulele şi antiparticulele pot fi generate spontan prin radiaţie de mare energie (generare de perechi) şi se pot anihila cu emisie de radiaţie.

Tabelul 2.1. Particule subatomice

Denumirea	Sarcina (în unităţi ale sarcinii elementare)	Masa de repaus (în unităţi ale masei electronului)	Însuşiri
Foton	0	0	Cuantă de energie de radiaţie electromagnetică (cuantă de lumină)
Leptoni			
Neutrino	0	0	Particule stabile, produse prin dezintegrarea de mezoni şi barioni
Antineutrino	0	0	
Electron	−1	1	Unitatea stabilă formînd învelişul de electroni al atomilor şi purtător al curentului electric
Pozitron	+1	1	Stabil, antiparticulă corespunzătoare electronului.
Mion	−1	206,8	Instabil cu durata de viaţă de 10^{-6} s, găsit în radiaţiile cosmice.
Antimion	+1	206,8	
Mezoni			
Mezon π	0	264	Mezonii sînt particule instabile, cu durata de viaţă de $10^{-8} \ldots 10^{-15}$ s. Sînt produşi prin dezintegrarea de barioni, precum şi în procese nucleare.
	−1, +1	273,3	
Mezon $\varkappa$	−1, +1	966	
Mezon η	0	~1100	

Tabelul 2.1 (continuare)

Denumirea	Sarcina (în unități ale sarcinii elementare)	Masa de repaus (în unități ale masei electronului)	Însușiri
Barioni			
Proton	+1	1836	Particulă nucleară stabilă.
Antiproton	−1	1836	Stabil
Neutron	0	1838,5	Particulă nucleară instabilă în vid (durata de viață 10^3 s).
Antineutron	0	1838,5	
Barioni Ξ, Σ, Λ, Δ și Ω	−2 la +2	2200...3800	Particule instabile, observate în reacțiile nucleare. Durata lor de viață este cîteodată de numai 10^{-23} s. În prezent sînt cunoscute circa 60.

Notă: Sarcina elementară $e = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ unități CGS electrostatice $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As. Masa electronului $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g.

Atomul este cea mai mare particulă de sine stătătoare a unui corp chimic unitar (element). El este format din *nucleu* și din *învelișul de electroni.*

Nucleul atomic este constituit din protoni și neutroni. Numărul protonilor indică *numărul de sarcină* al nucleului sau numărul atomic al elementului, pe cînd numărul total de protoni și neutroni determină cu aproximație masa totală a atomului *(masa atomică)*. Hotăritor pentru însușirile chimice ale atomului este numărul protonilor din nucleu. Atomii cu același număr de protoni însă cu un număr diferit de neutroni se numesc *izotopi.* Masa atomică relativă chimic determinată a unui element este o valoare medie a maselor atomice relative ale izotopilor săi (tabelul 2.2).

Învelișul de electroni al atomului cuprinde un număr de electroni egal cu cel al protonilor din nucleu. Astfel atomul considerat ca un întreg este neutru din punct de vedere electric. Conform *modelului de atom al lui Bohr,* electronii se rotesc în jurul nucleului pe orbite de energii diferite. Fiecare orbită se caracterizează prin patru numere cuantice și poate fi ocupată numai de un singur electron. Mai multe orbite formează cîte o subgrupă, iar acestea la rîndul lor pături. Prin excitația produsă prin iradiație de lumină sau șoc electronii se pot ridica la orbite sau niveluri energetice mai mari. La revenirea unui electron pe orbita inițială, această energie va fi emisă ca radiație electromagnetică (radiație Roentgen, lumină). Dacă primesc suficientă energie, electronii pot fi smulși din înveliș (ionizare). În acest caz, atomul rămîne ca ion cu sarcină pozitivă. În mod corespunzător, prin captarea de electroni pot apare ioni cu sarcină negativă.

Molecula este cea mai mică particulă unitară a unei combinații chimice. Molecula este formată din atomi, legați între ei prin legătură chimică.

În corpuri solide atomii și moleculele sînt în general dispuse în mod regulat într-o rețea. Unitățile de bază ale rețelei pot fi atomii (în cazul metalelor, ca de ex. la cupru), cristalele covalente (de ex. la diamant), ionii (în rețele ionice, de ex. la sare gemă brută) sau moleculele (în rețele moleculare, de ex. la oxigen solid).

Tabelul 2.2. **Masa atomică relativă a elementelor** [1])

Elementul	Masa atomică relativă	Numărul atomic	Elementul	Masa atomică relativă	Numărul atomic
Actiniu .... Ac	(227)	89	Mendeleviu .... Md	(256)	101
Aluminiu .... Al	26,9815	13	Mercur .... Hg	200,59	80
Americiu .... Am	(243)	95	Molibden .... Mo	95,94	42
Antimoniu .... Sb	121,75	51	Neodmiu .... Nd	144,24	60
Argint .... Ag	107,870	47	Neon .... Ne	20,183	10
Argon .... Ar	39,948	18	Neptuniu .... Np	(237)	93
Arsen .... As	74,9216	33	Nichel.............. Ni	58,71	28
Astatin .... At	(210)	85	Niobiu .... Nb	92,906	41
Aur .... Au	196,967	79	Nitrogen .... N	14,0067	7
Bariu .... Ba	137,34	56	Nobeliu .... No	(253)	102
Beriliu .... Be	9,0122	4	Osmiu.............. Os	190,2	76
Berkeliu .... Bk	(247)	97	Oxigen .... O	15,9994	8
Bismut .... Bi	208,980	83	Paladiu .... Pd	106,4	46
Bor .... B	10,811	5	Platină .... Pt	195,09	78
Brom .... Br	79,909	35	Plumb .... Pb	207,19	82
Cadmiu .... Cd	112,40	48	Plutoniu............. Pu	(242)	94
Calciu .... Ca	40,08	20	Poloniu .... Po	(210)	84
Californiu .... Cf	(249)	98	Potasiu .... K	39,102	19
Carbon C	12,01115	6	Praseodimiu .... Pr	140,907	59
Ceriu .... Ce	140,12	58	Prometiu .... Pm		
Cesiu .... Cs	132,905	55	(Il:niu .... Il)	(145)	61
Clor................. Cl	35,453	17	Protactiniu .... Pa	(231)	91
Crom .... Cr	51,996	24	Radiu............... Ra	(226)	88
Cripton .... Kr	83,80	36	Radon .... Rn	(222)	86
Cobalt .... Co	58,9332	27	Reniu .... Re	186,2	75
Cupru .... Cu	63,54	29	Rodiu .... Rh	102,905	45
Curiu .... Cm	(247)	96	Rubidiu............. Rb	85,47	37
Disprosiu .... Dy	162,50	66	Ruteniu .... Ru	101,07	44
Einsteiniu .... Es	(254)	99	Sumariu............. Sm	150,35	62
Erbiu .... Er	167,26	68	Scandiu .... Sc	44,956	21
Europiu .... Eu	151,96	63	Seleniu .... Se	78,96	34
Fermiu .... Fm	(253)	100	Siliciu .... Si	28,086	14
Fier................. Fe	55,847	26	Sodiu .... Na	22,9898	11
Fluor .... F	18,9984	9	Staniu .... Sn	118,69	50
Fosfor.............. P	30,9738	15	Stronţiu .... Sr	87,62	38
Franciu .... Fr	(223)	87	Sulf................ S	32,064	16
Gadoliniu .... Gd	157,25	64	Tantal .... Ta	180,948	73
Galliu .... Ga	69,72	31	Tehnetiu .... Tc	(99)	43
Germaniu .... Ge	72,59	32	Teluriu .... Te	127,60	52
Hafniu .... Hf	178,49	72	Terbiu .... Tb	158,924	65
Heliu .... He	4,0026	2	Talliu .... Tl	204,37	81
Holmiu .... Ho	164,930	67	Toriu .... Th	232,038	90
Hidrogen .... H	1,00797	1	Tuliu .... Tm	168,934	69
Indiu .... In	114,82	49	Titan .... Ti	47,90	22
Iod I	126,9044	53	Tungsten (Wolfram) .. W	183,85	74
Iridiu .... Ir	192,2	77	Uraniu .... U	238,03	92
Lantan .... La	138,91	57	Vanadiu V	50,942	23
Lawrenciu .... Lw	(257)	103	Xenon .... Xe	131,30	54
Litiu Li	6,939	3	Yterbiu .... Yb	173,04	70
Luteţiu .... Lu	174,97	71	Ytriu .... Y	88,905	39
Magnesiu .... Mg	24,312	12	Zinc .... Zn	65,37	30
Mangan .... Mn	54,9380	25	Zirconiu .... Zr	91,22	40

[1]) Factorul de conversiune pentru transformare de la scara chimică în scara fizică este 1,000275. Cifrele scrise în paranteză în tabelele 2.2 și 2.3 dau numărul de masă a izotopilor elementelor radioactive sintetice care au cea mai lungă perioadă de înjumătățire sau sînt cele mai ușor accesibile.

Aşezarea regulată a structurii reţelei se poate extinde pe zone largi (structura cristalină) sau să fie restrînsă la zone mici (structura microcristalină, cazul limită: starea amorfă). La temperatura de zero absolut (−273,16°C), unităţile reţelei sînt vîrtual în repaus. La temperaturi mai mari, ele vibrează în jurul poziţiei lor de echilibru. Totodată se slăbesc forţele de coeziune în reţea. Cu creşterea mai departe a temperaturii, reţeaua se distruge, substanţa devine lichidă şi în final gazoasă, iar moleculele se pot disocia.

Natura corpusculară a luminii

Unele particularităţi ale luminii, — ca de exemplu efectul fotoelectric, — nu se pot explica pe baza teoriei naturii ondulatorii a luminii. De aceea a trebuit să se atribuie luminii şi proprietăţi corpusculare, în afară de cele ondulatorii. În acest caz, lumina este considerată ca fiind constituită din particule mici, fără masă de repaus şi fără sarcină, adică din cuante de lumină sau fotoni a căror energie depinde de frecvenţa luminii şi anume: $E = h\nu$, unde h este constanta lui Planck, iar ν — frecvenţa.

Natura ondulatorie a luminii

Totodată este necesar de a atribui electronilor şi proprietăţi ondulatorii pentru a explica difracţia electronilor şi fenomenele de interferenţă. Proprietăţile corpusculare şi cele ondulatorii sînt legate între ele prin ecuaţia lui Broglie $\lambda = \frac{h}{mv}$. Definind V(în V) ca $V = \frac{mv^2}{2e}$, putem scrie $\lambda = \sqrt{150/V} \cdot 10^{-8}$ cm. În aceste două cazuri vorbim de dualismul undă-particulară.

Aceste dificultăţi de concepţie le preîntîmpină mecanica cuantelor care arată că astfel de întrebări ca „Electronul este în realitate de natură corpusculară sau ondulatorie?" sînt lipsite de sens din punct de vedere fizic, deoarece nu li se poate da un răspuns pe bază de demonstraţii experimentale. Mecanica cuantelor se rezumă la precizarea şi corelarea unor rezultate care pot fi deduse din cantităţi ce pot fi determinate pe cale experimentală (de ex. intensităţi, transformări de energie, probabilităţi pe baza observaţiilor), folosind metode matematice. Se renunţă în mare măsură la o redare demonstrativă a proceselor. În consecinţă, afirmaţiile privind proprietăţile corpusculare sau ondulatorii ale electronilor sau ale cuantelor de lumină dau numai o imagine-model incompletă a unor procese care nu pot fi descrise prin concepţii vizuale.

Tabloul periodic al elementelor

Analizînd elementele în ordinea crescătoare a numărului atomic, se pot distinge anumite periodicităţi şi asemănări ale proprietăţilor lor. În funcţie de modul de grupare adoptat, se observă mai uşor asemănările privind proprietăţile lor fizice, — de exemplu structura electronilor sau proprietăţile lor chimice (tabelul 2.3).

Tabelul 2.3. Sistemul periodic al elementelor

I a	I b	II a	II b	III a	III b	IV a	IV b	V a	V b	VI a	VI b	VII a	VII b	VIII	0
1 H 1,00797															2He 4,0026
3 Li 6,939		4 Be 9,0122		5 B 10,811			6 C 12,01115		7 N 14,0067		8 O 15,9994		9 F 18,9984		10 Ne 20,183
11 Na 22,9898		12 Mg 24,312		13 Al 26,9815			14 Si 28,086		15 P 30,9738		16 S 32,064		17 Cl 35,453		18 Ar 39,948
19 K 39,102		20 Ca 40,08			21 Sc 44,956	22 Ti 47,90		23 V 50,942		24 Cr 51,996		25 Mn 54,9380		26 Fe 27 Co 28 Ni 55,847 58,933 58,71	
	29 Cu 63,54		30 Zn 65,37	31 Ga 69,72			32 Ge 72,59		33 As 74,9216		34 Se 78,96		35 Br 79,909		36 Kr 83,80
37 Rb 85,47		38 Sr 87,62			39 Y 88,905	40 Zr 91,22		41 Nb 92,906		42 Mo 95,94		43 Tc (99)		44 Ru 45 Rh 46 Pd 101,07 102,905 106,4	
	47 Ag 107,870		48 Cd 112,41	49 In 114,82			50 Sn 118,69		51 Sb 121,75		52 Te 127,60		53 I 126,9044		54 Xe 131,30
55 Cs 132,905		56 Ba 137,34		57-71 Pămînturi rare[1])		72 Hf 178,49		73 Ta 180,948		74 W 183,85		75 Re 186,2		76 Os 77 Ir 78 Pt 190,2 192,2 195,09	
	79 Au 196,967		80 Hg 200,59	81 Tl 204,37			82 Pb 207,19		83 Bi 208,980		84 Po (210)		85 At (210)		86 Rn (222)
87 Fr (223)		88 Ra (226)			89 Ac (227)	90 Th 232,038		91 Pa (231)		92 U 238,03		93 . . . Elemente transuranice [2])			

[1])	57 La 138,91	58 Ce 140,12	59 Pr 140,907	60 Nd 144,24	61 Pm (145)	62 Sm 150,35	63 u 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,924	66 Dy 163,50	67 Ho 164,930	68 Er 167,26	69 Tm 168,934	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97

[2])	93 Np (237)	94 Pu (242)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (249)	99 E (254)	100 Fm (253)	101 Md (256)	102 No (253)	103 Lw (257)

Substanțe chimice

Tabelul 2.4. **Denumirile comerciale și chimice ale unor materiale**

Denumirea comercială	Denumirea chimică	Formula
Acetilenă	Acetilenă	C_2H_2
Acid carbolic	Fenol	C_6H_5OH
Acid carbonic	Bioxid de carbon	CO_2
Acid cianhidric	Acid cianhidric	HCN
Acid clorhidric	Acid clorhidric	$HCl + xH_2O$
Acid cromic	Trioxid de crom	CrO_3
Acid fluorhidric	Acid fluorhidric	HF
Acid oxalic	Acid oxalic	$C_2O_4H_2 \cdot 2H_2O$
Acid sulfuric	Acid sulfuric	H_2SO_4
Alaun (Alaun de potasiu)	Sulfat de aluminiu-potasiu	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$
Alaun amoniac	Sulfat de aluminiu-amoniu	$(NH_4)Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$
Alaun crom	Sulfat de potasiu — crom	$KCr(SO_4)_2 12H_2O$
Alaun de sodiu	Sulfat de sodiu — aluminiu	$NaAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$
Albastru de Prusia	Ferocianură ferică	$Fe_4[Fe(CN)_6]_3$
Alb de barită (alb permanent)	Sulfat de bariu	$BaSO_4$
Alb de plumb	Carbonat de plumb bazic	$2\ PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$
Alb de zinc	Oxid de zinc	ZnO
Alumină calcinată	Oxid de aluminiu	Al_2O_3
Amoniac soluție	Hidroxid de amoniu	$NH_3 + xH_2O$
Anticlor	Tiosulfat de sodiu	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$
Antimonit	Trisulfură de antimoniu (III)	Sb_2S_3
Apă de clor	Apă de clor	$Cl_2 + \times H_2O$
Apă regală	Apă regală	$HNO_3 + 3HCl$
Apă tare	Acid azotic	HNO_3
Argilă decolorantă	Silicați Al-Mg cu conținut de apă	
Arsen	Trioxid de arsen (III)	As_2O_3
Azotat de potasiu	Azotat de potasiu	KNO_3
Bachelită	Produs de condensare a formaldehidei de fenol	—
Barită	Oxid de bariu	BaO
Betonită	Silicați de aluminiu cu conținut de apă	—
Baritină	Sulfat de bariu	$BaSO_4$
Bicarbonat de sodiu	Bicarbonat de sodiu	$NaHCO_3$
Blendă	Sulfură de zinc	ZnS
Borax	Bi-tetraborat de sodiu	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$
Calaican	Sulfat feros	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$
Calce sodată	Oxid de calciu + Hidroxid de sodiu	$CaO + NaOH$
Calgon	Preparat din polimetafosfați cu greutate moleculară mare și medie	—
Calomel	Clorură de mercur (II)	Hg_2Cl_2
Caolină	Silicat de aluminiu	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
Carborund	Carbură de siliciu	SiC
Cenușă de oase	Fosfați impuri de calciu	—
Cerargirit	Clorură de argint	$AgCl$
Cianamidă de calciu	Cianamidă de calciu	$CaCN_2$
Cianură de potasiu	Cianură de potasiu	KCN
Clorură de calciu	Clorură de calciu	$CaCl_2 + 6H_2O$
Clorură de staniu	Clorură de staniu (II)	$SnCl_2 \cdot 2H_2O$
	Clorură de staniu (IV)	$SnCl_4$
Clorură de var	Clorură de var	$CaOCl_2$
Clorură de zinc	Clorură de zinc	$ZnCl_2$
Cocleală	Amestec de acetați de cupru bazici	$Cu(C_2H_3O_2)_2 + nCu(OH)_2 + yH_2O$
Corindon (Șmirghel)	Oxid de aluminiu	Al_2O_3
Cretă	Carbonat (silicat) de calciu	$CaCO_3(CaSiO_3)$

Tabelul 2.4 (continuare)

Denumirea comercială	Denumirea chimică	Formula
Cretă (Aragonită, calcită)	Carbonat de calciu	$CaCO_3$
Criolit	Fluorură de sodiu-aluminiu	Na_3AlF_6
Cromat de potasiu galben	Cromat de potasiu	K_2CrO_4
roșu	Bicromat de potasiu	$K_2Cr_2O_7$
Decalină	Decahidronaftalină	$C_{10}H_{18}$
Dextroză	Glucoză	$C_6H_{12}O_6 \cdot H_2O$
Emetic	Tartrat de antimoniu și potasiu	$2K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot H_2O$
Eter	Eter dietilic	$(C_2H_5)_2O$
Ferocianură de potasiu	Ferocianură de potasiu	$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$
Formol	Soluție de formaldehidă de 35—40%	—
Fosgen	Oxiclorură de carbon	$COCl_2$
Galben de crom	Cromat de plumb	$PbCrO_4$
Galben de zinc	Cromat de zinc	$K_2O \cdot 4ZnO \cdot 4CrO_3 \cdot 3H_2O$
Galenă	Sulfură de plumb naturală	PbS
Gaz ilariant	Protoxid de azot	N_2O
Gaz metan	Metan	CH_4
Glicerină	Glicerină	$C_3H_8O_3$
Hidrogen sulfurat	Hidrogen sulfurat	H_2S
Hidroxid de aluminiu	Hidroxid de aluminiu	$Al(OH)_3$
Hidroxid de potasiu	Hidroxid de potasiu	KOH
Hidroxid de sodiu anhidru	Hidroxid de sodiu	$NaOH$
Hidroxid de sodiu cristalizat	Hidroxid de sodiu	$NaOH + xH_2O$
Ipsos	Sulfat de calciu	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Kieserit (Sare amară)	Sulfat de magneziu	$MgSO_4H_2O$
Leșie potasică caustică	Hidroxid de potasiu	$KOH + xH_2O$
Litargă	Oxid de plumb (II)	PbO
Litopon	Sulfură de zinc + sulfură de bariu	$ZnS + BaSO_4$
Lizol	Soluție de săpun creuzolic	—
Magnezie	Oxid de magneziu	MgO
Malahit	Carbonat de cupru bazic	$CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$
Marmură	Carbonat de calciu	$CaCO_3$
Metanol	Alcool metilic	CH_3OH
Miniu de plumb	Oxid de plumb (II, IV)	Pb_3O_4
Negru de fum	Carbon	C
Oleum	Acid sulfuric fumigent	$H_2SO_4 \cdot SO_3$
Oxid de fier	Hidroxid de fier (II)	$Fe_2O_3 \cdot Fe(OH)_2$
Oxid de antimoniu	Oxid de antimoniu	Sb_2O_3
Oțet	Acid acetic	CH_3COOH
Piatră de var	Carbonat de calciu	$CaCO_3$
Piatra iadului	Azotat de argint	$AgNO_3$
Piatră vînătă	Sulfat de cupru	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$
Piroluzit	Bioxid de mangan (IV)	MnO_2
Piroluzit amestecat cu alte minerale manganifere	Oxid de mangan (II)	MnO
Potasă	Carbonat de potasiu	K_2CO_3
Potasă caustică	Hidroxid de potasiu	KOH
Praf de copt	Bicarbonat de sodiu	$NaHCO_3$
Rugină	Hidroxid de fier (III)	$Fe_2O_3 \cdot Fe(OH)_2$
Salpetru	Azotat de potasiu	KNO_3
Salpetru de Chile	Azotat de sodiu	$NaNO_3$
Săpun moale (lichid)	Sarea de potasiu a acidulu gras	—

Tabelul 2.4 (continuare)

Denumirea comercială	Denumirea chimică	Formula
Săpun tare (solid)	Sarea de sodiu a acidului gras	—
Sare de bucătărie	Clorură de sodiu	$NaCl$
Sare de fixaj	Tiosulfit de sodiu	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$
Sare de lipit	Clorură (II) de staniu + Clorură de amoniu	$SnCl_2 + 2NH_4Cl$
Sare de măcriş	Oxalat acid de potasiu	$C_2O_4KH \cdot C_2O_4H_2 \cdot \cdot 2H_2O$
Sare de staniu	Clorură stanoasă	$Sn\ Cl_2 \cdot 2H_2$
Sarea lui Pink	Clorură de staniu — clorură de amoniu	$SnCl_4 2NH_4Cl$
Sarea lui Mohr	Sulfat de feroamoniu	$Fe(NH_4)_2\ (SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
Sare Seignette	Tartrat de potasiu — sodiu	$KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$
Silicagel	Bioxid de siliciu	SiO_2
Silvin	Clorură de potasiu	KCl
Sodă calcinată	Carbonat de sodiu	Na_2CO_3
Sodă caustică	Hidroxid de sodiu	$NaOH$
Sodă cristalină	Carbonat de sodiu	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$
Soluţie de lipit	Soluţie apoasă de sare de lipit	—
Spat fluorhidric	Fluorură de calciu	CaF_2
Spirt	Alcool	C_2H_5OH
Steatit (o varietate de talc)	Steatit	$Mg(OH)_4$ Si_8O_{20}
Sticlă solubilă	Silicat de sodiu sau Sare de potasiu	Compoziţie variabilă
Sublimat corosiv	Clorură mercurică	$HgCl_2$
Sulfat de cupru	Sulfat de cupru	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$
Sulfat feros cristalizat	Sulfat de fier (II)	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$
Sulfat de sodiu (cristalizat)	Sulfat de sodiu	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$
Talc	Talc	$Mg(OH)_4 \cdot Si_8O_{20}$
Tartrat acid de potasiu	Tartrat acid de potasiu	$KC_4H_4O_6$
Triclorură de antimoniu	Clorură de antimoniu (III)	$SbCl_3$
Ţipirig	Clorură de amoniu	NH_4Cl
Ulei de fuzel	Amestec de amilizobutil şi n-propilic	—
Var		
ars	Oxid de calciu	CaO
stins	Hidroxid de calciu	$Ca(OH)_2$
Verde de crom	Hidrat de oxid de crom (III)	$Cr_2O_3 + xH_2O$
Zahăr de plumb	Acetat de plumb	$Pb(C_2H_3O_2)_2 3H_2O$

2.2. RADIOACTIVITATEA

2.2.1. Definirea noţiunilor

Un *element chimic* reprezintă o grupare de specii de atomi capabili de reacţii chimice identice. Aceste grupări sînt caracterizate prin numărul atomic [1] care corespunde cu numărul protonilor existenţi în nucleul atomic; modul curent de denumire este numele elementului.

Un *nuclid* înseamnă o specie atomică definită de un singur număr atomic Z şi un număr de masă A; acesta din urmă reprezintă suma protonilor şi neutronilor existenţi în nucleu

[1]) Atomii unui element au acelaşi număr atomic.

şi este cu aproximaţie egal cu masa atomică relativă a nuclidului respectiv. Nuclizii se caracterizează prin numărul de masă ataşat la numele elementului de exemplu 238 U (se obişnuiesc şi alte moduri de scriere ^{238}U, U—238 sau uraniu 238).

Izotopii sînt nuclizi cu acelaşi număr atomic, însă cu număr de masă diferit; astfel 235U şi 238U sînt izotopi ai uraniului. Noţiunile de nuclid şi izotop nu spun nimic în legătură cu faptul dacă specia atomică respectivă este stabilă sau radioactivă; nucleele radioactive sînt denumite radionuclizi sau radioizotopi.

Nuclizii izobari au aceeaşi număr de masă, însă număr atomic diferit. Din doi izotopi vecini întotdeauna cel puţin unul este radioactiv[1]), de ex.



64 Co* — 64 Ni — 64 Cu* — 64 Zn.

Nuclizii izomeri au acelaşi număr atomic şi acelaşi număr de masă, se deosebesc însă prin nivelul de energie al nucleelor. Nucleul cu nivel de energie mai mare (indicat printr-un m aşezat după numărul de masă, de ex. ^{110m} Ag) poate trece într-o stare de energie mai mică prin emiterea unei cuante de energie (^{110} Ag).

2.2.2. Dezintegrarea radioactivă

Nuclizii sînt stabili numai dacă nucleul prezintă o compoziţie optimă, care se exprimă printr-un echilibru între protoni şi neutroni. Nuclizii din afara domeniului de stabilitate au tendinţa de a se stabiliza printr-o transformare radioactivă, adică prin emiterea unei particule sau cuante de energie din nucleu. În funcţie de poziţia nuclidului faţă de domeniul de stabilitate, apar în acest proces diferite feluri de dezintegrări.

Dezintegrarea α este însoţită de emiterea unui nucleu de heliu, constînd din doi protoni şi doi neutroni; nuclidul iniţial se transformă astfel într-un nuclid cu numărul de masă cu patru unităţi mai uşor şi cu numărul atomic mai mic cu două unităţi (de ex. ^{238} U α ^{234} Th). Dezintegrarea α apare în special la nucleele atomice grele existente în natură (situate după bismut).

Parcursul particulelor aflat într-un mediu şi deci şi energia lor este constantă pentru un anumit nuclid. În funcţie de energia particulelor, parcursul în aer al acestora este de pînă la circa 12 cm. Particulele alfa sînt absorbite chiar de hîrtia subţire.

Dezintegrarea β^-. O dezintegrare β^- apare în cazul în care numărul neutronilor din nucleul iniţial este mai mare decît cel corespunzător configuraţiei stabile. La dezintegrarea β^- un neutron al nucleului se transformă într-un proton şi un electron, acesta din urmă părăsind nucleul ca radiaţie β. În acest caz, nuclidul iniţial trece în nuclidul izobar cu următorul număr atomic mai mare. În acelaşi timp cu pierderea electronului, nucleul emite şi un neutrino, care preia o parte variabilă din energia de dezintegrare; radiaţiile β nu sînt deci monoenergetice, ci prezintă un spectru de energii continuu. Pentru radiaţiile β cu o energie E (în MeV) parcursul măsurat în gram materie pe cm[2] secţiune de fascicul, este[2])

$$0{,}542\ E - 0{,}133 \qquad \text{pentru } E > 0{,}8 \text{ MeV},$$

$$0{,}407\ E^{1{,}38} \qquad \text{pentru } 0{,}15 \text{ MeV} < E < 0{,}8 \text{ MeV},$$

$$\frac{2}{3} E^{5/3} \qquad \text{pentru } 0{,}05 \text{ MeV} < E < 0{,}15 \text{ MeV}.$$

[1]) Semnul * indică elementele radionuclide.

[2]) Landolt-Börnstein, vol. I, partea 5 (Nuclee atomice); Berlin — Göttingen — Heidelberg, editura Springer 1952.

Parcursul pentru diferitele substanţe, în centimetri, se poate obţine împărţind aceste valori cu densitatea respectivă în g/cm³ (fig. 2.1).

Dezintegrarea β^+ este însoţită de emiterea unui pozitron; nucleul iniţial trece în nucleul izobar cu următorul număr atomic mai mic (cel mai apropiat). Dezintegrarea β^+

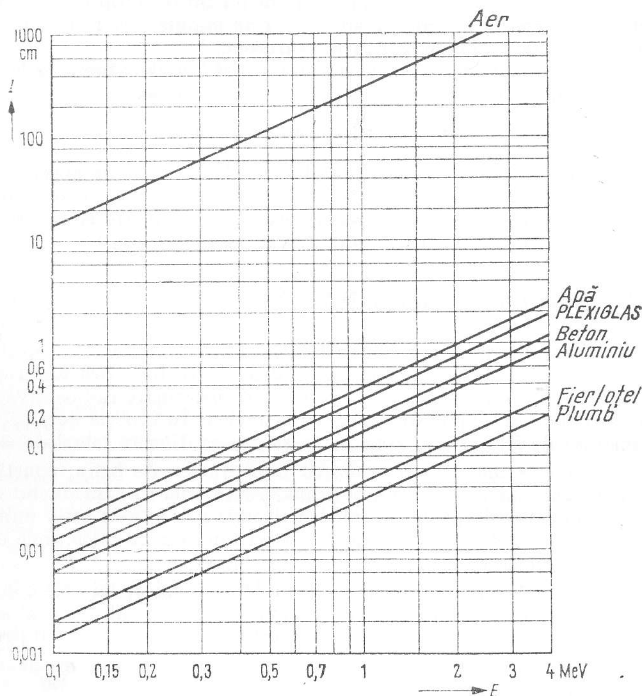


Fig. 2.1. Parcursul electronilor în diferite materiale, în funcţie de energie.

are loc la nucleele care prezintă o lipsă de neutroni. Pozitronul emis se transformă la întîlnirea cu un electron, împreună cu acesta, în două cuante γ cu o energie de cîte 0,51 MeV fiecare (radiaţie de anihilare).

Radiaţia γ este emisă la trecerea unui nucleu de la un nivel de energie mai mare a unul mai mic; energia cuantei corespunde diferenţei de energie dintre cele două nivele. Radiaţia γ apare adesea o dată cu dezintegrarea β^-, deoarece aceasta din urmă nu conduce în general la o stare stabilă a nucleului final, ci la o stare de mare energie, aşa-numita *stare de excitaţie*. Radiaţiile γ cu energii mai mari de 1,02 MeV pot pierde energie prin producere de perechi („crearea" unui electron şi a unui pozitron).

Captura-K: La acest gen de transformare nucleul captează un electron din pătura nterioară a învelişului de electroni (pătura K); la deplasarea electronilor externi pentru a ocupa locul rămas liber se emite radiaţia Roentgen (radiaţia K) caracteristică elementului respectiv. Captura K apare ca şi dezintegrarea β^+ la nuclizii cu lipsă de neutron

conducînd, ca şi dezintegrarea β^+ la nuclidul izobar cu următorul (cel mai apropiat) număr atomic mai mic.

Tranziţie izomeră: v. nuclizi izomeri.

Fisiune spontană. La o serie de nuclee grele din domeniul elementelor transuraniene, pe lîngă dezintegrarea α se observă şi fracţiunea nucleelor în fragmente mari.

Radiaţie neutronică. În cazuri foarte rare, un surplus de neutroni poate conduce în mod direct la emisia unui neutron.

2.2.3. Legile dezintegrării radioactive

$$N(t) = N(0)\,e^{-\lambda t}$$

unde: $N(0)$ este numărul atomilor existenţi într-un radionuclid la momentul $t = 0$;
$N(t)$ — numărul de atomi ai radionuclidului după timpul t;
λ — constanta de dezintegrare a radionuclidului (fracţiunea atomului dezintegrat într-o unitate de timp aleasă suficient de mică).

Timpul de înjumătăţire este timpul în care se dezintegrează jumătate din atomii radioactivi ai unui radionuclid

$$T_{\frac{1}{2}} = 0{,}693\,\lambda^{-1}$$

Activitatea unui radionuclid este

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N(0)\,e^{-\lambda t} = A(0)\,e^{-\lambda t}.$$

Pentru activitatea reziduală A după timpul t este deci valabilă aceeaşi lege ca şi pentru restul de atomi radioactivi; λ are aceeaşi dimensiune ca şi t^{-1}. În continuare este dată o regulă empirică pentru aprecierea aproximativă a vitezei de dezintegrare, respectiv a activităţii unui nuclid dat, cu activitatea iniţială cunoscută:

— după 3 timpi de înjumătăţire mai rămîne numai circa 10% ;

— după 6 timpi de înjumătăţire mai rămîne numai circa 1% ;

— după 10 timpi, de înjumătăţire mai rămîn numai circa 0,1% din activitatea iniţială.

Unitatea de activitate este *curie*-ul (Ci).

1 Ci $\approx 3{,}700 \cdot 10^{10}$ dezintegrări pe secundă.

În fig. 2.2 se prezintă o nomogramă de determinare a radioactivităţii reziduale $100\,N(t)/N(0)$ respectiv $100 \cdot A(t)/A(0)$.

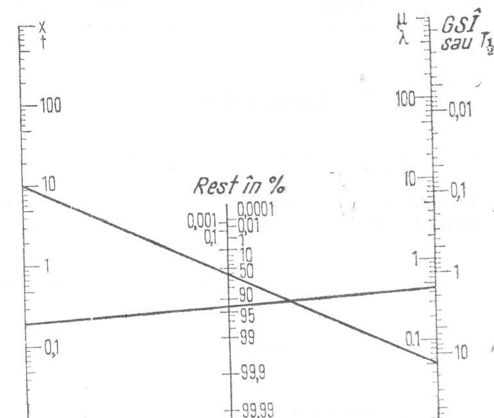


Fig. 2.2. Nomograma pentru determinarea restului de atomi radioactivi şi a radiaţiei reziduale în spatele unui ecran. Unităţile de timp şi de lungime trebuie alese egale la ambele scări de timp. Prin grosimea stratului de înjumătăţire se înţelege grosimea unui corp absorbant, necesară pentru a reduce la jumătate debitul dozei la un fascicul de radiaţie: x-grosimea ecranului; t-timpu de descreştere μ — coeficientul de atenuare; λ — constanta de dezintegrare; $T_{\frac{1}{2}}$ — timpul de înjumătăţire; GSI — grosimea stratulu de înjumătăţire a ecranului.

Exemplu: Timpul de înjumătăţire $T_{\frac{1}{2}}$ a radiului este de circa 1600 ani. După un timp de descreştere t = 200 ani cantitatea de radiu existentă încă este de 92%. Ca unitate de timp s-au ales 10^3 ani. În tabelul 2.5 sînt daţi timpii de înjumătăţire şi constantele de dezintegrare ale cîtorva radionuclizi importanţi.

Tabelul 2.5. **Timpii de înjumătăţire şi constantele de dezintegrare**

Elementul	Izotopul	Timp de înjumătăţire $T_{\frac{1}{2}}$	Constanta de dezintegrare λ	Emisiune specifică de radiaţii γ $\frac{Rm^2}{h\ Ci}$
Argon	^{41}A	1,83 h	0,378 h^{-1}	0,66
Cesiu	^{137}Cs	30 a	$2,3 \cdot 10^{-2}$ a^{-1}	0,36
Carbon	^{14}C	$5,5 \cdot 10^3$ a	$1,3 \cdot 10^{-4}$ a^{-1}	—
Cripton	^{85}Kr	10 a	0,069 a^{-1}	$2,1 \cdot 10^{-3}$
Crom	^{51}Cr	28 d	$2,5 \cdot 10^{-2}$ d^{-1}	0,018
Cobalt	^{60}Co	5,2 a	0,13 a^{-1}	1,3
Hidrogen (tritiu)	^{3}H	12,3 a	0,056 a^{-1}	—
Iod	^{131}I	8,1 d	0,086 d^{-1}	0,23
Iridiu	^{192}Ir	74 d	$9,3 \cdot 10^{-3}$ d^{-1}	0,55
Mangan	^{56}Mn	2,58 h	0,269 h^{-1}	0,84
Radiu	^{226}Ra	$1,62 \cdot 10^3$ a	$4,27 \cdot 10^{-4}$ a^{-1}	0,93
Stronţiu	^{96}Sr	28 a	$2,5 \cdot 10^{-2}$ a^{-1}	—
Uraniu	^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ a	$1,5 \cdot 10^{-10}$ a^{-1}	$9,1 \cdot 10^{-3}$
Uraniu	^{235}U	$7,1 \cdot 10^8$ a	$9,8 \cdot 10^{-10}$ a^{-1}	$9,0 \cdot 10^{-2}$
Xenon	^{133}Xe	5,3 d	0,13 d^{-1}	$1,4 \cdot 10^{-2}$

2.2.4. Radioactivitatea naturală

Nuclizii radioactivi existenţi în natură se pot împărţi în două grupe:

a) Nuclizi care datorită timpului lor lung de înjumătăţire de peste 10^8 ani au rezistat timpului de la formarea elementelor şi pînă în zilele noastre. Cîţiva nuclizi importanţi din această grupă sînt daţi în tabelul 2.6.

Tabelul 2.6. **Cîţiva radionuclizi naturali**

Radionuclidul	Timpul de înjumătăţire	Felul dezintegrării	Activitatea specifică [1]) Ci/g de element [2])
Plumb 204	$1,4 \cdot 10^{17}$	α	$1,8 \cdot 10^{-16}$
Potasiu 40	$1,3 \cdot 10^9$	β^-, K, γ	$8,1 \cdot 10^{-19}$
Radiu 226	$1,62 \cdot 10^3$	α, γ	1
Rubidiu 87	$4,7 \cdot 10^{10}$	β^-	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Samariu 147	$1,2 \cdot 10^{11}$	α	$3,0 \cdot 10^{-9}$
Toriu 232	$1,4 \cdot 10^{10}$	α, γ	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Uraniu 235	$7,1 \cdot 10^8$	α, γ	$1,5 \cdot 10^{-8}$
Uraniu 238	$4,5 \cdot 10^9$	α, γ	$3,3 \cdot 10^{-7}$

[1]) Fără substanţe intermediare.
[2]) Amestec natural de izotopi.

La dezintegrarea izotopilor de uraniu şi toriu — în contrast cu ceilalţi nuclizi amintiţi — nu se formează nuclee stabile, ci substanţe intermediare, care la rîndul lor sînt şi ele radioactive. Acestea se stabilizează printr-o serie de dezintegrări α şi β^-, pînă ce se formează izotopi de plumb ca produse finale stabile. Fiecare din cei trei nuclizi amintiţi (uraniu — 235, uraniu — 238, toriu — 232) formează o serie proprie de dezintegrare; unul din cei mai cunoscuţi produşi de dezintegrare îl constituie radiul — 226 (timp de înjumătăţire 1620 ani) care se formează la seria de dezintegrare a ^{238}U. Nivelul activităţii produselor intermediare se determină prin producerea din substanţa de bază şi dezintegrarea proprie şi se defineşte printr-un aşa numit *echilibru de dezintegrare.*

b) Nuclizi care se produc continuu din reacţiile nucleare din natură. Cele mai importante exemple pentru aceasta sînt radionuclizi tritiu şi carbon (hidrogen greu şi carbon cu numărul de masă 3 şi 14), formaţi sub acţiunea radiaţiilor cosmice în straturile superioare ale atmosferei.

2.2.5. Radioactivitatea artificială

Din majoritatea nuclizilor stabili se pot produce prin reacţii nucleare nuclizi cu radioactivitate artificială; ca agent de activare în acest proces pot servi particule (neutroni, protoni etc.) precum şi — în cazuri rare — radiaţiile γ de mare energie. Ca măsură a probabilităţii ca să apară o astfel de reacţie — sau în general o interacţiune între corpuscul sau foton şi substanţă —serveşte secţiunea eficace. În funcţie de felul interacţiunii se deosebesc secţiuni de dispersie, secţiuni de absorbţie, secţiuni eficace totale etc.

Secţiunea eficace *microscopică* σ (în cm^2) se poate reprezenta ca o suprafaţă de întîlnire faţă de radiaţie a unei singure particule şi depinde atît de proprietăţile particulei şi ale nucleului ciocnit, cît şi de energia radiaţiei. Ca unitate a secţiunii eficace microscopice σ se foloseşte adesea barn-ul (b); $1b = 10^{-24}\ cm^2$. Secţiunea eficace *macroscopică* Σ(în cm^{-1}) este produsul dintre secţiunea eficace microscopică (cm^2) şi numărul nucleelor cuprinse într-un cm^3 din suprafaţa supusă iradierii. $\Sigma\Delta x$ este fracţiunea de corpusculi sau de fotoni, care la străpungerea unui strat subţire de grosime Δx intră în interacţiune cu nucleele acestuia.

În cazul practic cel mai important de producere a radionuclizilor artificiali prin iradiere cu neutroni, activitatea specifică rezultată, pentru un timp de iradiere t, este dată de următoarea relaţie

$$A = \frac{\Phi\sigma \cdot 10^{-24} N_A G H}{P 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 10^2} (1 - e^{-\lambda t}),$$

în care: A este activitatea rezultată la sfîrşitul iradiaţiei, în Ci/g;
Φ — densitatea fluxului de neutroni, în $cm^{-2} \cdot s^{-1}$;
σ — secţiunea eficace pentru reacţia nucleară respectivă, în barni;
N_A — numărul lui Avogadro ($6,0 \cdot 10^{23}$);
G — greutatea elementului folosit în reacţia nucleară;
P — masa atomică relativă a elementului;
H — frecvenţa relativă a nuclidului activabil în amestecul de izotopi al elementului respectiv.

Din expresia cuprinsă între paranteze reiese că activitatea rezultată nu creşte liniar cu timpul de iradiere t. În tabelul 2.7 sînt date, pentru unele elemente, cei mai importanţi radionuclizi formaţi în cîmpul de neutroni cu valorile σ, H şi T, precum şi activitatea specifică maximă posibilă care poate fi atinsă pentru un gram al elementului iniţial, la o densitate a fluxului de neutroni de $1 \cdot 10^{13}\ cm^{-2} \cdot s^{-1}$.

Tabelul 2.7. **Activarea unor elemente prin neutroni**

Element iniţial	Reacţia nucleară	σ barni	H %	$T_{\frac{1}{2}}$	Activitatea maximă posibilă specifică Ci/g
Antimoniu	$^{121}Sb(n, \gamma)^{122}Sb$	6,8	57,3	2,8 zile	5,2
	$^{123}Sb(n, \gamma)^{124}Sb$	25	42,7	60 zile	1,4
Argint	$^{107}Ag(n, \gamma)^{108}Ag$	45	51,4	2,3 min	35
	$^{109}Ag(n, \gamma)^{110}mAg$	3,2	48,6	253 zile	2,3
Crom	$^{50}Cr(n, \gamma)^{51}Cr$	15,9	4,3	27,8 zile	2,2
	$^{54}Cr(n, \gamma)^{55}Cr$	0,38	2,4	3,6 min	0,027
Cobalt	$^{59}Co(n, \gamma)^{60}mCo$	16	100	10,5 min	44
	$^{59}Co(n, \gamma)^{60}Co$	20	100	5,2 ani	47
Cupru	$^{63}Cu(n, \gamma)^{64}Cu$	4,51	69,1	12,8 h	8,0
Fier	$^{54}Fe(n, \gamma)^{55}Fe$	2,8	5,8	2,6 ani	0,49
	$^{58}Fe(n, \gamma)^{59}Fe$	1,0	0,33	45 zile	0,0092
Mangan	$^{55}Mn(n, \gamma)^{56}Mn$	13,3	100	2,58 h	39
Nichel	$^{62}Ni(n, \gamma)^{63}Ni$	15	3,7	120 ani	0,57
	$^{64}Ni(n, \gamma)^{65}Ni$	1,5	1,1	2,56 h	0,044
Sodiu	$^{23}Na(n, \gamma)^{24}Na$	0,53	100	15,4 h	3,7

2.2.6. Protecţia contra radiaţiilor

Radiaţia substanţelor radioactive, ca şi radiaţia Roentgen, este dăunătoare sănătăţii. Din acestă cauză la folosireasubstanţelor radioactive trebuie luate măsuri de protecţie. În cele ce urmează se va vorbi despre felul şi gravitatea pericolului, precum şi despre eficacitatea dispozitivelor de protecţie.

Doza de energie este energia absorbită de la cîmpul de radiaţie ionizantă în unitatea de masă a corpului iradiat. Unitatea dozei de energie este rad-ul (rd).

$$1\ rd = 10^{-2}\ J/kg = 100\ erg/g.$$

Energia de radiaţie ionizantă necesară pentru formarea unei perechi de ioni este pentru aer şi ţesuturi de 31 pînă la 35 eV ($1\ eV = 1{,}60 \cdot 10^{-12}$ erg).

Doza de ioni şi doza standard de ioni

La producerea unei sarcini electrice într-un volum de aer

doza de ioni		doza standard de ioni
	a unei	
radiaţii ionizante		radiaţii Roentgen sau gama

este raportul dintre sarcina electrică a ionilor de acelaşi semn şi masa volumului de aer

fără echilibrul electronilor	în cazul echilibrului electronilor

Echilibrul electronilor se obţine dacă pentru fiecare electron cu energie E, care pătrunde din volumul de aer al camerei de măsurare în pereţii ei, un electron cu aceeaşi energie va trece din pereţi în volumul de aer.

Unitatea dozei de ioni şi a dozei de ioni standard este roentgenul, R

$$1R = 2{,}58 \cdot 10^{-4}\ As/kg \text{ de aer}$$

$$1R \approx 87{,}7\ erg/g \text{ de aer}$$

$$1R = \frac{1 \text{ unitate electrostatică de sarcină electrică}}{cm^3 \text{ de aer (în condiţii normale)}}$$

$$1R = 2{,}08 \cdot 10^9 \frac{\text{perechi purtătoare de sarcini}}{cm^3 \text{ de aer (în condiţii normale)}}.$$

Doza biologică echivalentă. Efectul biologic al radiaţiei depinde nu numai de numărul ionilor formaţi în ţesut prin radiaţie, ci şi de distribuţia lor în ţesut. Radiaţiile α, care la pătrunderea prin substanţă dau naştere unei succesiuni dense de ioni, sînt deci mai eficace decît radiaţiile β sau γ. Factorul care indică de cîte ori trebuie să fie mai mare doza de energie de radiaţii Roentgen pentru a produce acelaşi efect biologic ca alte tipuri de radiaţii (de ex. radiaţii α, β neutroni) se numeşte factor EBR (eficienţă biologică relativă). Factorul EBR indică deci eficienţa unui fel de radiaţie

Tabelul 2.8. **Factorii EBR**

Felul radiaţiei	Factorul EBR [1])	Felul radiaţiei	Factorul EBR [1])
Radiaţii Roentgen (X) 0,1 pînă la 100 MeV	1	Neutroni (termici)	3
Radiaţii γ	1	Neutroni 0,02 MeV	5
Fascicul de 0,1 la 100 MeV	1	Neutroni 0,1 MeV	8
Protoni pînă la 10 MeV	10	Neutroni 0,5 MeV	10
Nuclee de recul grele	20	Neutroni 1 MeV	10,5
Radiaţii α	20	Neutroni 5 MeV	7
		Neutroni 10 MeV	6,5

[1]) U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards Handbook 63, 1957.

în comparaţie cu radiaţiile Roentgen sau radiaţii γ de 200 eV. Factorii EBR depind nu numai de tipul radiaţiei, ci şi de tipul organismului sau organului iradiat. În tabelul 2.8 se dau valorile estimative ale factorilor EBR.

Doza biologică echivalentă se indică în „rem" (rad echivalent man), rem = EBR rd.

Rem-ul este doza de energie (în rd) de radiaţii γ care produce în ţesutul omenesc acelaşi efect biologic ca şi o doză de 1/EBR rd a unui alt fel de radiaţie. Doza indicată în rem este deci o doză biologică echivalentă.

Debitul dozei (sau doza debit) este doza absorbită în unitatea de timp. Unitatea pentru debitul dozei de energie este rd/s = 10^{-2} W/kg = 100 erg/(g.s), iar pentru debitul dozei biologice este rem/s.

Ca unitate de timp se folosesc adesea și ora (h) și anul (a) rezultînd pentru mărimile de mai sus unitățile rd/h, rd/a, respectiv rem/h, rem/a.

Calculul debitului dozei pentru radiații β

Debitul dozei de radiație d (în rd/s) într-un strat este

$$d = 1{,}6 \cdot 10^{-8} J \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx},$$

unde: $\frac{dE}{dx}$ este capacitatea de frînare a absorbantului pentru electroni de energie E, în MeV/cm (v. tab. 2.9);
ρ — densitatea absorbantului, în g/cm^3;
$\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}$ — capacitatea de frînare de masă, în MeV cm^2/g;
J — densitatea fluxului de electroni, în cm^{-2}·s^{-1}.

Tabelul 2.9. Valori ale capacității de frînare pentru țesuturi (ρ = 1 g/cm^3)

Energia electronilor, keV	1	2	4	10	20	40	100	200	500
Capacitate de frînare, MeV/mm	12,3	7,7	4,6	2,3	1,34	0,78	0,417	0,284	0,205

Deoarece capacitatea de frînare este dependentă de energie și numai o mică parte din electronii emiși posedă energie maximă E, ecuația de mai sus se poate folosi numai la aprecieri aproximative ale debitului dozei de radiație a unei surse de radiații β.

Pentru orientare, în ce privește ordinul de mărime al debitului dozei, amintim că la o distanță de 10 cm de la o sursă de radiații β neecranată, avînd o intensitate de 1mCi (energie 0,2 MeV) debitul dozei este de 5 rd/h.

Măsurarea dozei de radiație și a debitului dozei pentru radiații β

Se folosesc camere de ionizare și detectoare proporționale, care trebuie prevăzute cu ferestre sau pereți foarte subțiri. La măsurarea intensităților mici de radiație o importanță tot mai mare revine detectorului cu scintilație.

Doza de radiație se măsoară cu aparate integratoare de măsurare; ea poate fi determinată și cu dozimetre fotografice (fotodozimetre) (pentru stabilirea intensității de iradiere a persoanelor).

Calculul debitului dozei pentru radiații Roentgen și γ

Debitul dozei energetice $\dot{D}$ (în rd/s) în obiectul iradiat este

$$\dot{D} = 1{,}60 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\rho} E J \mu,$$

unde: E este energia fotonilor, în MeV;
J — densitatea fluxului, de fotoni, în cm^{-2}·s^{-1};
ρ — densitatea, în g/cm^3;
μ — coeficientul liniar de absorbție de energie pentru substanța iradiată, în cm^{-1} (v. fig. 2.6, 2.7, 2.8).

Debitul dozei biologice echivalente, în rem/s, se poate calcula cu aceeași formulă ca pentru radiații γ și Roentgen din cauză că EBR = 1. Pentru ρ și μ se vor introduce apoi valorile pentru țesuturi (mușchi).

Debitul dozei de ioni, în mR/h, este

$$\dot{D} = 6{,}58 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\rho_{aer}} E J \mu_{aer},$$

unde: μ_{aer} este coeficientul liniar de absorbție de energie pentru aer, în cm^{-1};
ρ_{aer} — densitatea aerului, în g/cm^3.

Legătura dintre debitul dozei biologice echivalente și debitul dozei măsurate în mR/h.

$$\dot{D}[\text{m rem/h}] = 0{,}877 \frac{\rho_{aer}\,\mu_{țesut}}{\rho_{țesut}\,\mu_{aer}} \dot{D}(\text{mR/h}) = f\dot{D}\,[\text{mR/h}].$$

În domeniul de energie între 0,1 și 3 MeV factorul f este aproape egal cu unitatea, așa încît pentru radiații gama doza biologică echivalentă se poate considera egală cu doza măsurată în roentgeni.

Debitul dozei biologice echivalente D (în m rem/h) *pentru o sursă punctiformă de radiație* γ dacă la fiecare dezintegrare se emit mai mulți fotoni, este

$$\dot{D} = 4{,}57 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\rho r^2} A A_1 \Sigma(E p \mu_{țesut}) e^{-\mu_a r},$$

unde: A este activitatea, în dezintegrări/s;
A_1 — factorul de acumulare al dozei;
p — probabilitatea de emisie, în %, a unui foton de energie E, în MeV;
r — distanța în aer a țesutului iradiat de la sursa punctiformă, în cm;
ρ — densitatea țesutului, în g/cm^3;
$\mu_{țesut}$ — coeficientul de absorbție liniar de energie al țesutului, în cm^{-1};
μ_{aer} — coeficientul liniar de atenuare pentru aer, în cm^{-1}.

Fig. 2.3 arată dependența debitului dozei biologice echivalente de distanța unei surse de radiație cu o intensitate de 1 mCi în aer, care emite la fiecare dezintegrare 1 foton. La distanțe mici (laboratoare), absorbția radiației în aer poate fi neglijată, iar factorul de acumulare al dozei se poate considera ca fiind A_1 = 1. Pentru o orientare rapidă asupra ordinului de mărime al sarcinii de radiație create printr-o sursă radioactivă punctiformă se poate considera că 1 mCi al unei surse de radiații γ (energia fotonului 2 MeV) produce la o distanță de 1m un debit al dozei biologice de 1 mrem/h.

Din fig. 2.4 se poate afla debitul dozei biologice echivalente care rezultă de la o sursă radioactivă de 1 Ci cu o energie de 0,5 sau 2 MeV/dezintegrare

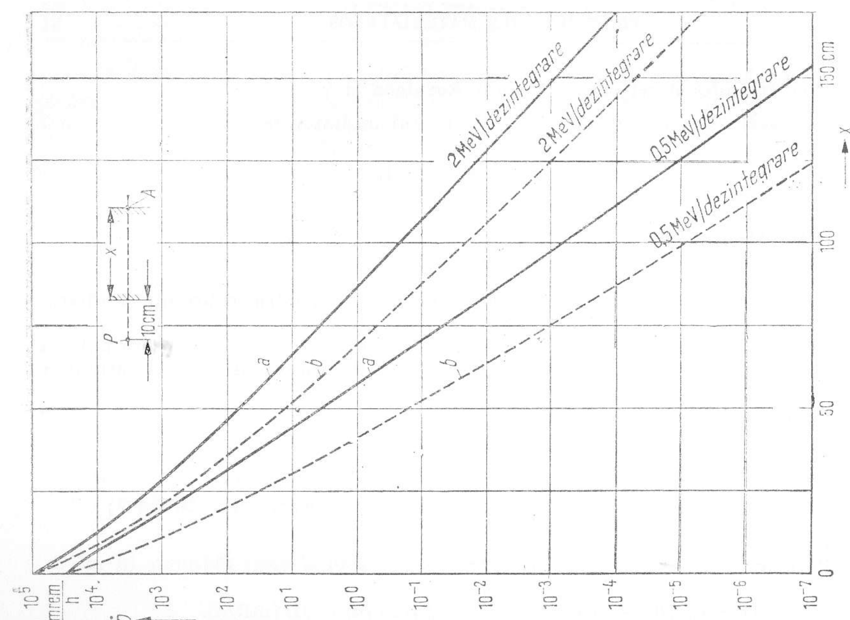


Fig. 2.4. Debitul dozei echivalente $\dot{D}$ a unei surse punctiforme P (de radiații γ) de 1 Ci la o distanță de 10 cm în fața unui perete din beton (ρ = 2,3 g/cm³) cu grosimea x și punct de captare A.

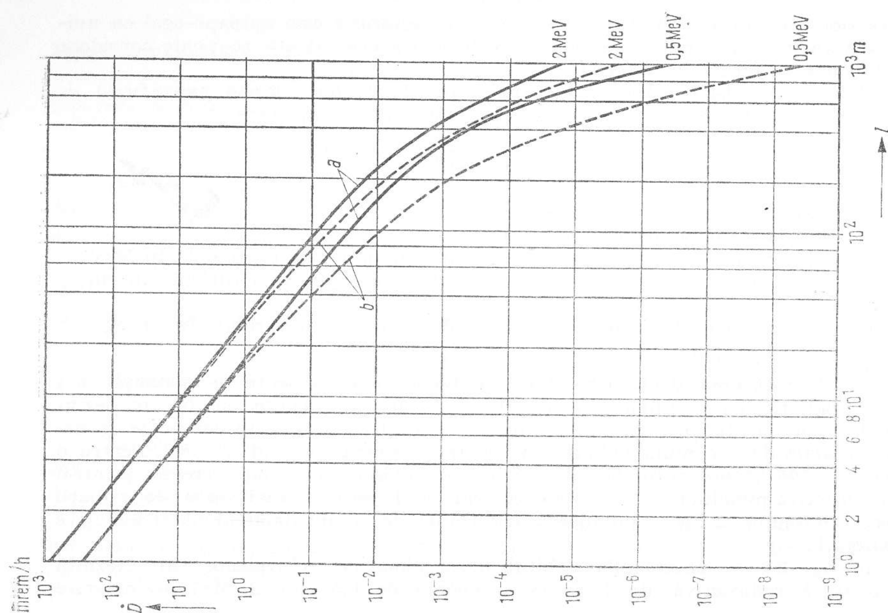


Fig. 2.3. Debitul dozei biologice echivalente $\dot{D}$ a unei surse de radiație punctiforme cu o intensitate de 1 Ci în funcție de distanța l în aer, pentru energiile de radiație de 0,5 și de 2 MeV/dezintegrare:
a — cu luarea în considerare a factorului de acumulare în aer;
b — fără luarea în considerare a factorului de acumulare în aer.

situată la 10 cm înaintea unui perete de beton (ρ = 2,35 g/cm³), într-un punct aflat imediat în spatele peretelui. Factorii de acumulare ai dozei pentru beton sînt indicați în fig. 2.5 pentru fotoni de diferite energii, în funcție de grosimea peretelui de beton (în lungimi de relaxare). Unitatea lungimii de relaxare este $1/\mu$, în cm.

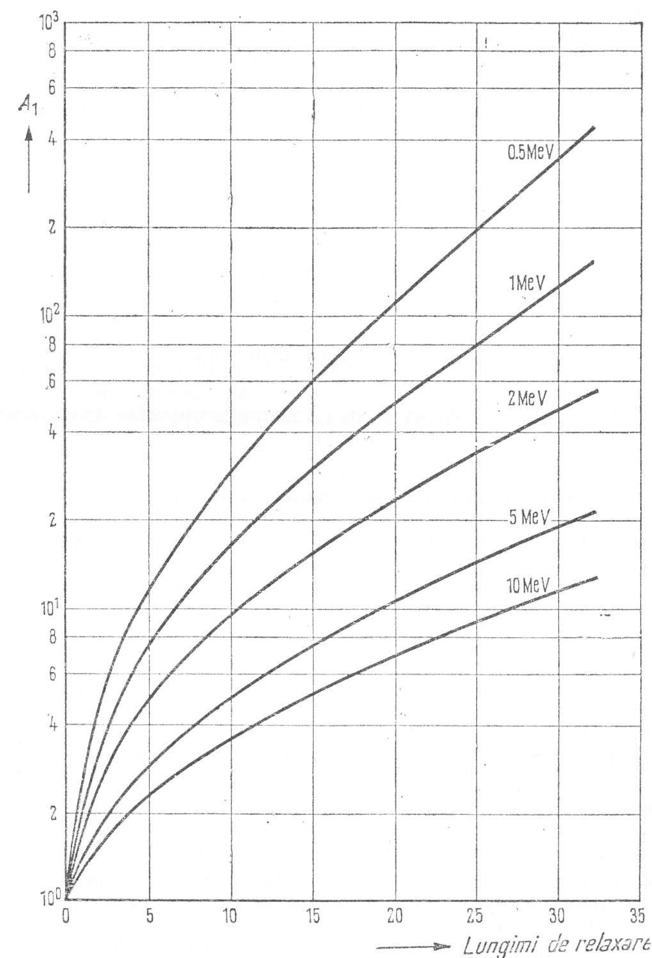


Fig. 2.5. Factorul de acumulare al dozei A_1 pentru beton (densitatea 2,3 g/cm³) pentru o sursă punctiformă.

Debitul dozei de ioni $\dot{D}$, în R/h, printr-o sursă de radiaţii γ considerată punctiformă, este:

$$\dot{D} = 1{,}5 \frac{1}{r^2} A A_1 \Sigma (E p \mu_a) e^{-\mu_a r},$$

unde: A este activitatea, în Ci;

- A_1 — factorul de acumulare al dozei;
- p — probabilitatea de emisie, în %, a unui foton de energie E, în MeV;
- μ_a — coeficientul liniar de atenuare pentru aer, în m^{-1};
- r — grosimea stratului de aer dintre sursa de radiaţie şi punctul de captare, în m.

Pentru prescurtare se scrie adesea

$$\dot{D} = I_\gamma \frac{1}{r^2} A A_1 e^{-\mu_a r},$$

unde I_γ este emisiunea specifică de radiaţii, reprezentînd debitul dozei de ioni a unei surse cu intensitatea de 1 Ci la o distanţă de 1 m.

$$I_\gamma = 1{,}5 \Sigma E p \mu_a [R.m^2/h \cdot Ci],$$

În tabelul 2.5, în ultima coloană se dau emisiunile specifice de radiaţii γ pentru unii nuclizi.

Măsurarea dozei şi a debitului dozei radiaţiilor Roentgen şi γ[1]

Pentru măsurarea debitului dozei şi a dozei se folosesc în mod curent următoarele aparate de măsurat:

Camerele de ionizare standard fiind incomode se folosesc numai pentru etalonări. Condiţiile de echilibru electronic se pot realiza uşor pînă la o energie a fotonilor de 0,5 MeV. Pentru radiaţii pînă la 3 MeV camerele se pot aşeza în recipienţi care conţin aer sub o presiune de 10... 15 at.

Camere perete. Pereţii constau dintr-un material echivalent cu aerul, adică dintr-un material al cărui număr atomic efectiv este acelaşi ca şi pentru aer. Pentru măsurarea debitului dozei în ţesuturi se folosesc camere ai căror pereţi sînt echivalenţi cu ţesuturile. De asemenea şi gazul de umplere trebuie să fie în acest caz echivalent cu ţesuturile.

Detectoarele proporţionale funcţionează cu gaz sub presiune; necesită însă o stabilizare mai bună a tensiunii de lucru în comparaţie cu camerele de ionizare. Impulsul de curent este proporţional cu energia fotonului care amorsează ionizarea.

Detectoarele Geiger-Müller se pot folosi în practică pentru măsurarea debitului dozei numai în anumite condiţii. Impulsul de curent este independent de energia unui foton absorbit de volumul de măsurat. Prin natura sa detectorul Geiger-Müller este un aparat care poate fi folosit numai pentru detectarea radiaţiilor.

[1] Riezler and Walcher: Kerntechnik, Stuttgart; Teubner 1958. Kiefer-Maushart: Strahlenschutzmesstechnik, Karlsruhe, Braun 1964.

Detectoare cu scintilaţie. Din cauza timpului mort redus detectorul cu scintilaţie se foloseşte pentru măsurarea intensităţilor mari de radiaţie. Datorită raportului bun între semnal şi zgomotul de fond, detectorul este indicat pentru transmiterea impulsurilor prin conducte cu o lungime pînă la circa 100 m la un aparat indicator.

Doza de ionizare se determină cu aparate de măsurat integratoare, dozimetre. Foarte răspîndite sînt camerele de ionizare care se bazează pe descărcarea prin ionizare, precum şi fotodozimetrele.

Ecranare

Densitatea fluxului de fotoni J într-un fascicul îngust în spatele unui ecran gros de x cm este $J(x) = J(0)\, e^{-\mu x}$,

în care: μ este coeficientul de atenuare liniar total, în cm^{-1};

$\Delta x \mu$ — probabilitatea absorbţiei sau a dispersiei unui foton într-un strat gros de Δx cm al corpului iradiat.

Radiaţia este atenuată prin fotoabsorbţie, prin dispersia Compton (dispersia fotonului însoţită de emisie de energie) şi prin formarea de perechi. Astfel, coeficientul de atenuare μ poate fi scris sub forma

$$\mu = \tau + \sigma + \varkappa, \qquad \text{(m)}$$

unde atenuarea Compton este constituită dintr-o fracţiune de absorbţie σ_A şi o fracţiune de dispersie σ_D; $\mu - \sigma_D$ este coeficientul liniar de absorbţie al energiei. Valorile numerice τ, σ şi $\varkappa$ depind de materialul şi de energia (lungimea de undă) a fotonilor incidenţi. Pentru unele materiale ele sînt cuprinse în fig. 2.6, 2.7 şi 2.8; pentru alte elemente ele se pot calcula din următoarele ecuaţii:[1]

$$\tau = \tau_{Pb} \cdot 4{,}04 \cdot 10^{-7}\, \rho Z^4 A^{-1};$$

$$\sigma = \sigma_{Pb} \cdot 0{,}223\, \rho Z A^{-1};$$

$$\varkappa = \varkappa_{Pb} \cdot 2{,}72 \cdot 10^{-3}\, \rho Z^2 A^{-1},$$

în care: τ este coeficientul de fotoabsorbţie, în cm^{-1};

- σ — coeficientul de atenuare Compton, în cm^{-1};
- $\varkappa$ — coeficientul de formare a perechilor, în cm^{-1};
- τ_{Pb}, σ_{Pb}, $\varkappa_{Pb}$, μ_{Pb} — v. fig. 2.6;
- ρ — densitatea, în g/cm^3;
- Z — numărul de sarcini ale nucleului;
- A — masa atomică relativă.

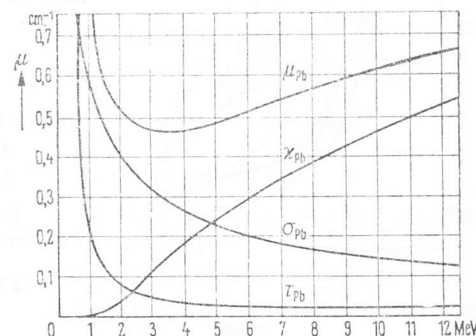


Fig. 2.6. Coeficientul de absorbţie liniar pentru plumb: τ_{Pb} — efectul foto; σ_{Pb} — efectul Compton; $\varkappa_{Pb}$ — efectul formării perechilor; μ_{Pb} — coeficientul total de atenuare.

[1] Landaldt-Börstein, vol. I, partea V (Nuclee atomice), ed. Springer, Berlin — Göttingen — Heidelberg, 1952.

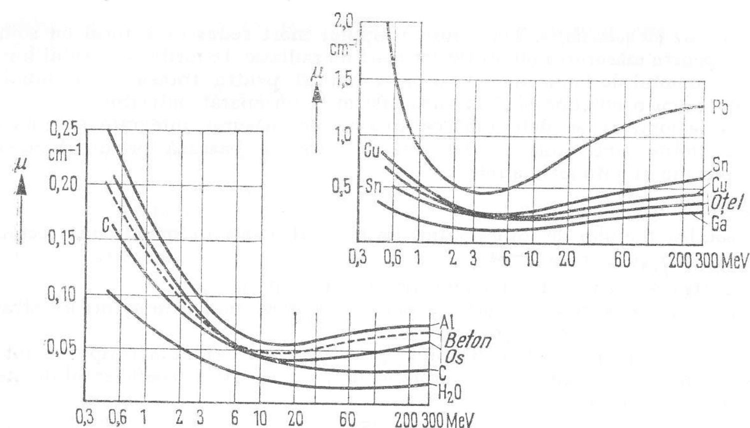


Fig. 2.7. Coeficienţii liniari de atenuare în funcţie de energia radiaţiilor γ.

Nomograma din fig. 2.2 serveşte la determinarea rapidă a radiaţiei reziduale în spatele unui ecran. În domeniul de energie al fotonilor, în care interacţiunea cu substanţa apare mai ales datorită efectului Compton, atenuarea radiaţiei depinde aproximativ numai de densitatea materialului.

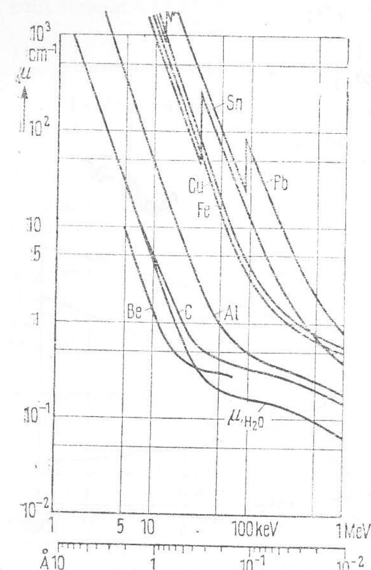


Fig. 2.8. Coeficienţii de atenuare ai diferitelor materiale în funcţie de energia radiaţiilor γ.

În cazul unui fascicul larg, o parte din radiaţia dispersată în ecran poate atinge, datorită fenomenului de dispersie, şi punctele situate în spatele ecranului, aşa încît densitatea fluxului de fotoni trebuie calculată cu ecuaţia $J(x) = A_1 J(0)\, e^{-\mu x}$. Factorul de acumulare A_1 este supraunitar. Pentru aer, factorul de acumulare la o energie de radiaţie E între 0,5 şi 2 MeV, se calculează din

$$A_1 = 1 + \mu r + \frac{(\mu r)^2}{7E^{2,4}},$$

unde: E este energia fotonilor, în MeV;
r — grosimea stratului de aer, în cm;
μ — coeficientul liniar de atenuare, în cm^{-1}.

În general A_1 nu se poate determina explicit. Pentru calculul lui $J(x)$ există nomograme.

2.3 NOŢIUNI CHIMICE ŞI CONSTANTE FIZICE

Masa atomică relativă (scara fizică) este raportul dintre masa unui atom şi a 12-a parte din masa izotopului de carbon ^{12}C.

Masa moleculară relativă (M): Suma maselor atomice ale tuturor atomilor care participă la structura moleculei.
Atom-gram: Cantitatea dintr-un element, avînd masa în grame, numeric egală cu masa atomică relativă. Un atom-gram conţine un număr de atomi egal cu numărul lui Avogadro.
Moleculă-gram (mol): Masa moleculară a unui compus, exprimată în grame.
Echivalent-gram: Echivalentul-gram este definit ca atomul-gram sau molecula-gram pe valenţă.
Echivalentul electrochimic: Cantitatea de material separată electrolitic printr-un curent de 1 A în 1 s.
Volumul molar: Volumul unui mol al unei substanţe.
Pentru un gaz ideal, volumul molar la 0°C şi 760 mm Hg este

$$V = 22,4 \cdot 10^3\ cm^3 \cdot mol^{-1}.$$

Tabelul 2.10. **Constante fizice**

Denumirea	Simbol	Valoare numerică	Unitatea
Acceleraţia gravitaţională (valoarea normală)	g_n	9,80665	m/s²
Constanta de gravitaţie	G	$6,670 \cdot 10^{-11}$	m³/(kg s²)
Constanta dielectrică în vid	ε_0	$8,85419 \cdot 10^{-11}$	F/m
Constanta gazelor	R	8,3143	J(grd mol)
Constanta lui Avogadro (numărul lui Loschmidt)	N_A	$6,02252 \cdot 10^{23}$	mol⁻¹
Constanta lui Boltzmann	k	$1,38054, \cdot 10^{-23}$	J/grd
Constanta lui Faraday pentru valenţa 1	F	$9,64870 \cdot 10^{4}$	C/mol
Constanta lui Planck	h	$6,6256 \cdot 10^{-34}$	Js
Constanta lui Ştefan-Boltzmann	σ	$5,6697 \cdot 10^{-8}$	W/(m² K⁴)
		$5,6697 \cdot 10^{-5}$	erg/(cm²s K⁴)
Echivalentul de energie al materiei	—	$8,9876 \cdot 10^{16}$	J/kg
Energia unui electron, accelerat prin 1 V	—	$1,6021 \cdot 10^{-19}$	J(10⁷erg = 1 J)
Impedanţa caracteristică a vidului	Z_0	376,73	Ω
Lungimea de undă Compton a electronilor	λ_C	$2,42621 \cdot 10^{-12}$	m(1Å = 10⁻¹⁰m)
Magnetonul lui Bohr	μ_β	$9,2732 \cdot 10^{-24}$	J/T(= A m²)
Magnetonul nuclear	μ_N	$5,0505 \cdot 10^{-27}$	J/T
Permeabilitatea vidului	μ_0	$1,256637 \cdot 10^{-8}$	H/cm
Pilă etalon Weston (tensiunea la 20°C)	E_0	1,0186	V
Punct triplu pentru apă (D_2O)	T_{tr}	276,98	°C
Raza electronului	r_e	$2,81777 \cdot 10^{-15}$	m
Raza traiectoriei standard a unui electron H	r	$5,29167 \cdot 10^{-11}$	m
Sarcina electrică elementară	e	$1,60210 \cdot 10^{-19}$	C
		$4,80298 \cdot 10^{-10}$	unităţi electrostatice CGS
Viteza luminii în vid	c_0	$2,997925 \cdot 10^{8}$	m/s
Viteza unui electron cu o energie de 1eV	—	$5,94 \cdot 10^{5}$	m/s
Viteza termică a electronului (25°C, 300 K)	—	$1,17 \cdot 10^{5}$	m/s
Viteza termică a unui neutron (25°C, 300 K)	—	$2,74 \cdot 10^{3}$	m/s
Volumul unui mol	—	$2,2414 \cdot 10^{4}$	cm³/mol

Numărul de molecule în 1 cm^3 este în consecință:

$$N_L = L/V = 2{,}69 \cdot 10^{19}\ cm^{-3} \text{ la } 0°C \text{ și } 760 \text{ mm Hg}.$$

2.4. CONSTANTE DE MATERIAL

În tabelele 2.11, 2.12 și 2.13 se dau constantele pentru cele mai importante materiale folosite în electrotehnică.

Observație: Unitatea de viscozitate (viscozitate dinamică) este Poise (P); centipoise (cP) este un submultiplu, folosit în mod curent:

$$1\ cP = 10^{-3}\ kg/ms.$$

Unitatea de viscozitate cinematică (viscozitate/densitate) este stokes (St); centistokoes (cSt) este folosit în mod curent ca submultiplu:

$$1\ cSt = 10^{-6}\ m^2/s.$$

Tabelul 2.11 **Constante ale unor materiale lichide**

Materialul	Densitatea cm^2/g	Viscozitatea la 20°C cP	Coeficientul de dilatație la 18°C $\times 10^{-3}$	Punctul de topire la 760 mm Hg °C	Punctul de fierbere la 760 mm Hg °C	Căldura latentă de topire kcal/kg	Căldura specifică kcal/(grd · kg)	Căldura latentă de evaporare kcal/kg	Temperatura critică °C	Presiunea critică atm	Constanta dielectrică relativă la 20°C	Formula chimică
Acetonă	0,791	0,337	1,43	− 94,6	56,2	23,0	0,514	124,5	236	62	20,7	C_3H_6O
Acid acetic	1,049	1,30	1,07	+ 16,7	118,5	46,4	0,491	96,8	321,6	57,11	6,15	$C_2H_4O_2$
Acid sulfuric ..	1,834	25,4	0,57	+ 10,38	338	26,0	0,331	122,1	—	—	>84	H_2SO_4
Acid sulfuros ..	1,03	—	—	− 73	−10	—	0,32	94,9	—	—	13,8	H_2SO_3
Alcool etilic ..	0,789	1,20	1,10	− 112	78,5	25	0,578	204	243	65,1	24,3	C_2H_6O
Alcool metilic ..	0,792	0,597	1,19	− 97,8	64,96	24	0,595	262,8	240	102,3	32,63	CH_4O
Amoniac	0,771	0,010	—	− 77,73	−33,41	108,1	1,0	283,6	132,4	115,2	17,8	NH_3
i-amil-acetat....	0,874	0,805	—	− 70,8	124	—	0,459	—	326,18	—	4,8	$C_7H_{14}O_2$
Anilină	1,022	4,40	0,84	− 6,2	184,32	20,95	0,478	107	425,65	52,35	6,89	C_6H_7N
Apă	0,998	1,005	0,18	0	100	79,7	0,997	584,9	374,1	217,7	80,4	H_2O
Apă grea	1,105	1,226	0,154 (20° C)	+ 3,82	101,42	—	1,006	—	307,8...371,1	225,8	78,25 (25 °C)	D_2O
Benzen	0,879	0,652	1,16	+ 5,5	80,1	30,4	0,416	94,3	288,94	47,9	2,284	C_6H_6
Cloroform	1,489	0,58	1,28	− 63,5	61,2	19,0	0,234	59,0	260	56,7	4,806	$CHCl_3$
Eter etilic......	0,714	0,233	1,62	− 116,3	34,6	24	0,556	89,3	195	37,5	4,335	$C_4H_{10}O$
Glicerină	1,261	1490	0,50	+ 17,9	290	42	0,540	—	—	—	42,5	$C_3H_8O_3$
Mercur	13,55	1,554	0,181	− 38,86	356,73	2,8	0,0332	69,7	1460	1076	1,0074 (400 °C)	Hg
Naftalină	1,145	—	—	+ 80,2	210,8	35,62	0,309	75,5	468,2	39,2	2,54	$C_{10}H_8$
Nitrobenzen ..	1,204	2,03	0,83	+ 5,7	210,8	23,5	0,339	95	—	—	35,74	$C_6H_5O_2N$
Petrol	0,80	—	0,99	—	—	—	0,500	—	—	—	2,1(18°C)	—
Sulfură de carbon	1,271	0,363	1,20	− 112,1	46,25	17,7	0,237	87,83	277	77,5	2,64	CS_2
Toluen	0,866	0,590	110,90	− 95	110,6	17,2	0,42	86	318,6	41,6	2,379	C_7H_8
Ulei de in	0,93...0,94	51,6	—	− 20	316	—	—	—	—	—	2,2(18 °C)	—
Ulei de mașină	0,9 ...0,93	ușor 113,8 greu 660,6 (15,6°C)	—	—	—	—	0,40	—	—	—	—	—
Ulei de ricin ..	0,960...0,967	950	0,69	+ 13	—	—	0,46	—	—	—	4,6(18° C)	—
Terebentină	0,855	1,46	9,7	− 10	161	—	0,43	70	(376)	—	2,7	$C_{10}H_{16}$
Xilen-m	0,864	0,620	0,99	− 47,4	139	25,8	0,412	82	346	35,8	2,374	C_8H_{10}

Tabelul 2.12. Constante ale unor materiale solide

Materialul	Densitatea $\frac{g}{cm^3}$	Coeficientul de dilatație liniară pe grd, între 0 și 100°C · 10^{-6}	Punctul de topire °C	Punctul de fierbere °C	Căldura latentă de topire $\frac{kcal}{kg}$	Căldura specifică $\frac{kcal}{grd \cdot kg}$	Conductivitatea termică (la 20°C) $\frac{kcal \cdot 10^{-3}}{grd \cdot cm \cdot s}$	Căldura de combustie $\frac{kcal}{kg}$	Rezistența la întindere $\frac{kgf}{mm^2}$
Alamă	8,1 ... 8,6	18,75	900	≈ 2300	40	0,0917	0,26	—	40 ... 60
Aliaj de lipit pe bază de cositor	—	—	100 ... 210	—	—	—	—	—	—
Alpaca	8,4	18,36	1100	—	—	0,094	0,055...0,115	—	—
Aluminiu	2,70	23,86	659,7	2447	85	0,216	0,570	—	20 ... 30
Antimoniu	6,69	12,8	630,5	1637	40	0,050	0,042	—	10
Argint	10,50	19,3	961,3	2180	26,0	0,0565	0,975	—	13 ... 14,5
Asfalt	1,1 ... 1,5	—	—	—	—	0,22	0,0017	9530	—
Aur	19,3	14,2	1064,76	2707	15,9	0,031	0,71	—	13,4
Bariu	3,61	19	710	1637	—	0,068	—	—	—
Beriliu	1,86	12,3	1283	2477	250 ... 275	0,277	0,43	—	—
Beton	2,2 ... 2,5	10 ... 14	—	—	—	0,21	0,002...0,003	—	—
Bismut	9,79	13,5	271,3	1560	13	0,029	0,0194	—	—
Bronz	7,4 ... 8,9	16,8 ... 29,5	—	—	—	≈0,086	0,061...0,14	—	15 ... 80
Cadmiu	8,64	29,4	321	765	13	0,056	0,22	—	7,0‖ 10,0⊥
Calciu	1,54	25,2	850	1487	78,5	0,157	—	—	—
Carbon diamant	3,01 ... 3,52	1,3	≈ 3600	4200	≈ 4000	0,121	—	8140 CO_2 / 2440 CO	—
grafit	2,3 ... 2,72	7,86	Subl. 3652	4200	≈ 4000	1,170	0,012	≈ 7860	—
cox	1,0 ... 1,7	5,40	—	—	≈ 4000	0,204	0,0085	≈ 7000	—
cărbune	1,2 ... 1,5	—	—	—	—	—	0,00029	≈ 7500	—
turbă	0,6 ... 0,8	—	—	—	—	—	0,00015	≈ 3800	—
Cărbune de lemn	0,3 ... 0,5	—	—	—	—	0,16	0,000139	7260	—
Cauciuc	0,92 ... 0,99	77	125	—	—	0,502	0,00045	10700	175 ... 300
Ceară	1,8	—	60 ... 65	—	—	0,7	0,00009	9000	—
Chilimbar	1,05 ... 1,1	—	250 ... 300	—	—	—	—	—	—
Ciment	2,7 ... 3,0	10 ... 14	—	—	—	0,20	0,00071	—	—
Constantan	8,9	14,5 ... 17	1190	—	—	0,098	0,054	—	—
Crom	7,20	6,6	1903	2642	61,53	0,107	0,165 (18°C)	—	10 ... 40
Cupru	8,96	16,86	1083	2595	49 ... 51	0,0921	0,941	590 (CuO)	40
Fenol	1,071	—	40,6	182	29	0,39	—	—	—
Fibră vulcan	1,1 ... 1,45	63,6	—	—	—	0,3312	0,001	—	—
Fier pur	7,87	11,5	1536	3070	67 ... 94	0,107	0,161	1260 FeO	20 ... 25
fontă cenușie	7,6	10,6	1200	—	≈ 23	0,13 ... 0,17	0,11	1680 Fe_3O_4	12 ... 26
oțel	7,7	10,5 ... 13,2	1170 ... 1530	—	—	0,11	0,108...0,115	1890 Fe_2O_3	37 ... 64
Fosfor (galben)	1,82	124	44,1	280	5,2	0,189	—	5950	—
Galiu	5,91	≈ 18	29,78	2227	—	0,089	—	—	—
Germaniu	5,33	6	937,2	2830	—	0,077	0,148	—	—
Indiu	7,30	30	156,17	2047	—	0,0556	—	—	—
Invar	7,9	0,9	—	—	—	0,120	0,0263	—	—
Iridiu	22,42	6,5	2443	4350	—	0,0311	0,35	—	56
Lemn									
fag	0,7 ... 0,9	2,57‖ 61,4⊥	—	—	—	≈ 0,42	≈ 0,0003‖	4100	13
abanos	1,11 ... 1,33	3,6‖ 40,4⊥	—	—	—	≈ 0,42	≈ 0,0003‖	—	—
molid	0,37 ... 0,85	5,41‖ 34,1⊥	—	—	—	≈ 0,42	≈ 0,0003‖		7,9‖
stejar	0,6 ... 0,9	4,92‖ 54,4⊥	—	—	—	≈ 0,42	≈ 0,0003‖	3990	9,5‖
pin	0,37 ... 0,85	5,41‖ 34,1⊥	—	—	—	≈ 0,42	≈ 0,0003‖	4890	7,5‖
Magneziu	1,74	26,0	649,5	1120	88	0,245	0,40	6080	12
Mangan	7,43	23,0	1244	2095	63,7	0,114	0,12	—	50,6 γ-Mn
Manganin	8,4	17,5	910	—	—	0,097	0,052	—	—
Mercur	13,55	61	− 38,86	356,73	2,8	0,0333	0,02	—	—
Metal Wood	9,7	—	60 ... 65	—	8	0,0352	0,031	—	4,5
Molibden	10,22	5,1	2620	4800	69,8	0,059	0,33	—	100 ... 250
Nichel	8,91	13,3	1455	2800	73,8	0,106	0,2	—	32,2
Niobiu	8,55	7,31	2468	≈ 4900	68,9	0,0640	0,125 (0°C)	—	27,3
Paladiu	12,1	11,9	1550	3560	36,3	0,0584	0,17	—	19,8
Parafină	0,86 ... 0,93	107 ... 477	42 ... 75	300	35	0,694	0,0006	—	—
Piatră de var	2,5 ... 2,8	—	—	—	—	0,21	0,0020	—	—
Platină	21,5	0,09	1769	4300	27,2	0,0315	0,17	—	34
Plumb	11,34	29,4	327,4	1751	5,6	0,031	0,0842	260	1,4
Plută	0,2 ... 0,35	—	—	—	—	0,4 ... 0,5	0,00013 ... 0,00017	—	—
Plutoniu	15,92...19,74	− 120 ... + 75	640	3000 ... 3200	3773	0,032	α-Phase 0,0105 [1]	—	42 ... 45 [2]
Potasiu	0,86	84	63,2	753,8	13	0,18	0,232	—	—
Reniu	21,04	6,6	3180	≈ 5000	42,42	0,0326	0,17	—	table 105,5...268,6; sîrme 236,9; bare 175,3
Rodiu	12,5	8,5	1960	3960	—	0,0592	0,36	—	48,1
Seleniu (metalic)	4,79	36,8 (40°C)	217,4	684,9	16,4	0,0767	0,006	—	—
Silicon	2,33	7,63	1423	2355	—	0,168	0,347	7830	70
Sodiu	0,971	71	97,82	890	27	0,292	0,33	—	—
Staniu (alb)	7,29	27	231,9	≈ 2687	14,2	0,0531	0,16	—	1,12
Sticlă de cuarț	2,65	0,5	1700	2200	—	0,19	0,03‖0,016⊥		7 ... 9
Sticlă (medie)	2,4 ... 2,8	7 ... 10	—	—		0,12 ... 0,2	≈0,002	—	7 ... 9
Sulf (rombic)	2,07	64,13	115,18	444,6	9,4	0,168	0,0006	2200	—
Tantal	16,65	6,5	2996	5400	41,5	0,0336	0,130	—	93
Titan	4,51	8,35	1668	3280	10,43	0,1249	0,037 (50°C)	510	—
Toriu	11,7	10,5	1695	4200	19,82	0,0281	0,090 (100°C)	—	38,4
Tungsten	19,27	4,5	3390	5500	—	0,0322	0,310	—	420
Uraniu	19,1	15,3	1130	3930	19,74	0,0278	0,0574 (0°C)	—	—
Vanadiu	6,12	8,3 (23 ... 100°C)	1890	≈ 3380	78,5	0,115	0,084 (70°C)	—	χ 20
Var (stins)	1,3 ... 1,4	—	—	—	—	0,214	—	—	—
Vopsea de email (email)	2,4 ... 5,0	—	960	—	—	0,0023 ... 0,0028	0,002 ... 0,003	—	30—32
Zgură de furnal înalt	2,0 ... 3,9	5,41	1300 ... 1430	—	≈50	0,20	0,00025	—	—
Zinc	7,13	30,7	419,5	907	26	0,0931	0,27	1300	27,5
Zircaloy 2	6,55	5,49 (100°C)	—	—	—	—	0,030	—	38 ... 55
Zirconiu	6,50	6,10 ... 7,52	1855	≈ 4380	60,3	0,0659	0,050 (25°C)	—	15 ... 45

[1]) Fără indicarea temperaturii.
[2]) În funcție de grosimea barei și de timpul de depozitare.

Tabelul 2.13. **Constante ale unor materiale gazoase**

Materialul	Densitatea (la 0°C şi 760 mm Hg) kg/m³	Conductivitatea termică la 4,4°C cal. 10^{-4}/grd. cm s	Căldura specifică kcal/grd. kg	$\gamma = \frac{cp}{cv}$ (15 °C)	Presiunea critică atm	Temperatura critică °C	Punct de topire °C	Punct de fierbere °C	Densitatea lichidului la punctul de fierbere g/cm³	Constanta dielectrică relativă la 0°C şi 760 mm Hg	1 l de apă dizolvă la 20 °C	Formula chimică
Acetilenă	1,175	0,45	0,3832	1,26	61,7	+ 35,5	− 80,8	−84,03	0,613	—	1,03	C_2H_2
Aer (fără CO_2)	1,293	0,58	0,219 (0 °C)	1,40 (0 °C)	38,49	−140,73	—	−191,4	0,875	1,000576	0,0187	—
Amoniac	0,771	0,53	0,5232	1,310	115,2	+132,4	− 77,73	− 33,41	0,68	1,0072	700	NH_3
Argon	1,784	0,42 [1])	0,1253	1,668	49,6	−122,44	−187,9	−185,88	1,404	1,00056	0,04	Ar
Azot	1,250	0,583	0,2477	1,404	34,5	−146,9	−210,5	−195,82	0,81	1,000606	0,016	N_2
Bioxid de carbon	1,977	0,356	0,1989	1,304	75,27	+ 31,0	− 57	− 78,45	1,53	1,000946	0,88	CO_2
Bioxid de sulf	2,926	0,20 [1])	0,1516	1,29	80,4	+157,5	− 72,5	− 10,02	1,460	1,00905	39,4	SO_2
Butan	2,732	0,33	—	—	37,4	+152,01	−138,29	− 0,50	0,600	—	—	C_4H_{10}
Clor	3,214	0,19	0,1149	1,355	78,5	+144	−101,5	− 34,1	1,558	1,97	2,300	Cl_2
Deuteriu	0,1796	3,09	—	—	16,98	−234,8	−245,6	−249,48	—	1,277 (20 K)	—	D_2
Etan	1,357	0,446	0,3861	1,22	48,4	+ 32,05	−183,3	− 88,6	0,546	1,00150	0,047	C_2H_6
Etilenă	1,2604	0,434	0,3592	1,255	50,1	+ 9,50	−169,15	−103,78	0,568	1,00150	0,122	C_2H_4
Fluor	1,696	0,599	—	—	56,8	−129	−217,9	−188,1	1,11	—	—	F_2
Heliu	0,1785	3,43	1,25 (−180°C)	1,66 (−180°C)	2,336	−267,95	−272,1	−268,94	0,125	1,000074	0,0088	He
Hexafluorură de sulf	6,602	0,336 (30°C)	0,159	—	38,3	+ 45,58	− 56	− 63,8	1,91 (−50 °C)	1,00191 (27,5 °C) 708 mm Hg)	—	SF_6
Hexafluorură de uraniu	4,68	0,140 (0°C)	0,108	1,063	≈50	≈+240	+ 64,05	+ 56,5	3,624 (65 °C)	1,0038 (19,6°)	—	UF_6
Hidrogen	0,0899	4,174	3,389	1,410	13,22	−239,9	−259,5	−252,77	0,0708	1,000264	0,0181	H_2
Hidrogen sulfurat	1,536	0,314	0,2533	1,32	91,9	+100,38	− 82,9	− 60,2	0,92	1,00332	2,61	H_2S
Kripton	3,744	0,21 [1])	—	1,68 (19°C)	56,0	− 63,75	−156,6	−153,40	2,15	—	0,062	Kr
Metan	0,717	0,744	0,5284	1,31	47,2	− 82,5	−182,52	−161,5	0,415	1,000944	0,0331	CH_4
Neon	0,900	1,10	—	1,64 (19 °C)	27,06	−228,75	−248,6	−246,06	1,207	1,000127	0,0104	Ne
Oxid de carbon	1,250	0,559	0,2478	1,404	35,68	−140,2	−207	−191,55	0,801	1,000695	0,023	CO
Oxid nitric	1,340	0,555	0,2329	1,400	66,7	− 92,9	−163	−151,75	—	1,00592	0,0471	NO
Oxigen	1,429	0,594	0,2178	1,401	51,8	−118,32	−219	−182,97	1,131	1,000547	0,0315	O_2
Oxon	2,142	—	—	1,29 (0°C)	56,4	− 12,1	−192,1	−111,9	—	—	0,450	O_3
Propan	2,0096	0,372	—	1,13 (16)°C 0,5 atm)	42,1	+ 96,8	−187,7	− 42,1	0,585	—	—	C_3H_8
Propilenă	1,915	—	—	—	45,6	+ 91,76	−185,25	− 47,70	0,609	—	0,210	C_3H_6

[1]) Fără indicarea temperaturii

2.5. MATERIALE MAGNETICE

Tabelul 2.14. **Materiale** magnetic moi

Clasificare	Producătorul (v. nota la tabel)	Compoziția (în afară de Fe) % greutate	Permeabilitatea inițială μ_0 (la $H \approx 0$) Gs/Oe	μ_5 (la $H = 5$Oe) Gs/Oe	Permeabilitatea maximă μ_{max} Gs/Oe	Cîmpul coerciv $_BH_c$ Oe	Intensitatea de polarizație magnetică la saturație J_s/Gs	Rezistivitatea ρ Ωmm²/m	Densitatea g/cm³	Temperatura Curie °C	Pierderile prin histerezis erg/cm³	Pierderile magnetice totale V_5 W/kg	V_{10} W/kg	V_{15} W/kg	V_{20} W/kg
I. Fier pur:															
Oțel electrotehnic (purificat)	3	< 0,01 C		600...2000	10 000...40 000	0,08...0,4	21...21 500	0,1	7,8	770					
HYPERM O, grosime 0,35 mm	4	< 0,05 C	300		6200	1,0 (0,4...1,5)	21 500	0,12	7,86	768			1,6		
II. Fontă	1	2...3,5 C; 0,6...1,2 Si	300		2100	1,6	>15 000	0,5	7,2...7,6						
III. Tablă silicioasă:															
Tablă silicioasă I	1	0,7 Si	150		3000	2	21 000	0,18	7,85	762			3,6	8,6	
Tablă silicioasă II	1	1,0 Si	180		4000	0,8	20 000	0,23	7,8	760			3,0	7,2	
Tablă silicioasă III	1	1,7...2,7 Si	250		6000	0,8...1,0	19 500	0,31...0,43	7,7	755...745			2,6...2,0	6,3...4,9	
Tablă silicioasă IV (0,9) ..	1	3,4...4,3 Si	300...600		4000...10 000	0,3...0,6	19 000	0,5...0,6	7,55...7,6	738...726			1,7...1,0	4,0...2,5	
Tablă silicioasă IV (0,9)	1	4,3 Si			10 600	0,25	19 000	0,6				0,24	0,84	2,2	
TRAFOPERM N 2 cu miez toroidal (TC) [1]	3	2,9 Si		3000	35 000	0,1	20 300	0,4	7,65	750			0,45	1,0	
M 7 X cu cristale orientate (texturat)	2	3,2 Si			≈57 300 ≈36 000	0,09 0,2	20 300 20 000	0,48 0,57	7,65 7,55	740 730		0,14	0,47 0,55	1,1	2,7
HYPERM 5 T TC	4	4 Si	400		19 600	0,5	13 000	0,75	8,15	250		0,3	1,1		
IV. Materiale care conțin nichel:															
PERMENORM 3601 K1 TC	3	pînă la 36 Ni		2000	8000	0,1	13 000	0,65	8,15	230		0,18	0,6		
HYPERM 36	4	36 Ni	2000		11 000...14 000	0,015	15 000	0,45	8,25	500			0,1		
Nichel pur		99 Ni; 0,2 Cu; 0,4 Fe	250		2500	2,0	6000	0,085	8,8	358	3000				
PERMAX M TC	3	50 Ni		50 000	125 000	0,05	15 500	0,45	8,25	470			0,25	0,7	
PERMENORM 5000 H2 TC	3	50 Ni		6000	60 000...80 000	0,08...0,1	16 000	0,4	8,25	470					

Clasificare	Producătorul (v. nota la tabel)	Compoziția (în afară de Fe) °/₀ greutate	Permeabilitatea inițială μ_0 (la $H \approx 0$) Gs/Oe	μ_5 (la $H = 5$ Oe) Gs/Oe	Permeabilitatea maximă μ_{max} Gs/Oe	Cîmpul coerciv $_BH_c$ Oe
PERMENORM 5000 H 3 și S masiv	3	50 Ni		3000	35 000	
HYPERM 50	4	50 Ni	3350		28 000	0,06... 0,1
PERMENORM 5000 Z TC	3	50 Ni		300	50 000	0,12
MUMETAL TC	3	76 Ni; 5 Cu;		45 000	120 000	0,015
MUMETAL masiv	3	2 Cr		25 000	60 000	0,035
M 1040 TC	3	72 Ni; 14 Cu;		75 000	150 000	0,01
M 1040 masiv	3	3 Mo		40 000	80 000	0,015
ULTRAPERM 10 SUPERMALLOY TC	3, 7, 9	79 Ni; 5 Mo; 0,5 Mn		130 000	300 000	0,005
ULTRAPERM 10 (SUPERMALLOY) masiv	3, 7, 9				500 000	0,006
V. Materiale care conțin aluminiu:						
SENDUST		5,4 Al; 9,6 Si	35 000		120 000	0,022
VACODUR 16	3	16 Al	8000		40 000	0,05
VI. Materiale care conțin cobalt: VACOFLUX 50	3	49 Co; 1,8 V		1000	12 000	1,4
Cobalt pur		99 Co	70		240	10
VII. Aliaje termomagnetice: THERMOFLUX 65/100	3	30 Ni	Inducția puternic dependentă de temperatură De exemplu: cînd $H = 100$ Oe, avem $t =$ 0°C 20°C 40°C 50°C $B =$ 4100 Gs 3000 Gs 1800 Gs 1200 Gs			
(THERMALLOY, THERMOPERM)	4					

[1]) Miez toroidal TC pentru producătorul 3: μ_5 și μ_{max} pentru: miez toroidal la 50 Hz; părți masive în curent continuu.

Notă: Producători de materiale magnetice:
1. Hüten și Walzwerke.
2. Armco Steel Corp. Middletown, Ohio.
3. Vacuumschmelze GmbH, Hanau (VAC).
4. Fried. Krupp, WIDIA-Fabrik, Essen.
5. Deutsche Edelstahlwerke, Krefeld.
6. Gebr. Böhler & Co., Kapfenberg.
7. Bell Telphone Co., New York.
8. M. Baermann, Köln-Bensberg.
9. The Arnold Engineering Co., Marengo, Illinois.

Tabelul 2.14 (continuar

Intensitatea de polarizație magnetică la saturație Js/Gs	Rezistivitatea ρ Ωmm²/m	Densitatea g/cm³	Temperatura Curie °C	Pierderile prin histerezis erg/cm³	Pierderile magnetice totale V_5 W/kg	V_{10} W/kg	V_{15} W/kg	V_{20} W/kg
15 000	0,45	8,25	470		0,15	0,5		
15 500	0,45	8,25	470		0,175	0,4	0,78	
8000	0,55	8,6	400		0,025			
8000	0,55	8,6	400		—			
5800	0,6	8,7	270		0,015			
5800	0,6	8,7	270		—			
7800	0,6	8,7	400		0,01			
8000	0,6	8,75	410		—			
11 000	0,8	8,8	500	100				
9000	1,45	6,5	350					
23 500	0,4	8,15	950		0,54	2,0	3,2	5,5
18 000	0,07	8,8	1115	2000				
60°C 650 Gs	0,8	8,18	30...120					

Tabelul 2.15. Materiale magnetice dure

	Clasificarea	Producător (v. nota la tab. 2.14)	Compoziția nestandardizată (în afară de Fe), % greutate							
			Al	Co	Cr	Cu	Ni	Ti	W	V
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I.	Materiale standardizate [1]:									
1	Co 040	4, 5, 6	—	2,1	4,0	—	—	—	0,7	—
2	AlNi 120	4, 5, 6	12,0...13,0	0 ... 4,0	—	2,0...4,0	25,0...28,0	0 ...1,0	—	—
3	AlNiCo 160	4, 5, 6	9,0...13,0	12,0...17,0	—	2,0...6,0	18,0...24,0	0 ...1,0	—	—
4	AlNiCo 190 (în direcție preferențială)	4, 5, 6	9,0...12,0	12,0...17,0	—	2,0...4,0	19,0...24,0	0 ...1,0	—	—
5	AlNiCo 220	4, 5, 6	6,0... 8,0	24,0...30,0	—	3,0...6,0	13,0...19,0	5,0...9,0	—	—
6	AlNiCo 350	4, 5, 6	7,2... 7,7	30,0...34,0	—	4,0...4,5	14,5...15,0	5,0...5,5	—	—
7	AlNiCo 400 (în direcție preferențială)	4, 5, 6	8,0... 9,0	23,0...25,0	—	3,0...4,0	14,0...15,0	0 ...1,0	—	—
8	AlNiCo 500 (în direcție preferențială)	4, 5, 6	8,0... 9,0	23,0...25,0	—	3,0...4,0	14,0...16,0	—	—	—
9	Ferită de bariu 100	4, 5, 6	—	—	BaO · $6Fe_2O_3$)		—	—	—	—
10	Ferită de bariu 300 (în direcție preferențială)	4, 5, 6	—	—			—	—	—	—
II.	Materiale nestandardizate:									
1	AlNiCo 600 {(în direcție preferențială)	3	9,0	23,0	—	3,0	14,0	cu adaus de tantal		
2	AlNiCo 800 {policristalizare	3	9,0	23,0	—	3,0	14,0			
3	KOERZIT T (Vicalloy) (în direcție preferențială)	4,7	—	50,0	—	—	—	—	—	14,0
4	MAGNETOFLEX, turnat	3	—	—	—	60,0	20,0	—	—	—
5	MAGNETOFLEX, laminat (în direcție preferențială	3	—	—	—	60,0	20,0	—	—	—
6	CoNiCuA	3	—	49,0	—	25,0	26,0	—	—	—
7	CoNiCuB	3	—	45,1	—	30,0	25,0	—	—	—
8	CoNiCuC	3	—	41,0	—	35,0	24,0	—	—	—
9	CoNiCuD	3	—	37,0	—	40,0	23,0	—	—	—
10	CoNiCuE	3	—	29,0	—	50,0	21,0	—	—	—
11	TROMALIT	8	7	19,0	—	4,0	18,0	4,0	—	—
12	Mn Bi				79,2% Bi; 20,8% Mn					

1) După normele DIN.

Tabelul 2.15 (continuare)

	Prelucrarea prin 2)	Produsul $(BH)_{max}$ corespunzător energiei maxime 10^6GsOe	Intensitatea cîmpului magnetic de funcționare la $(BH)_{max}$ H_a Oe	Inducția de funcționare la $(BH)_{max}$ B_a Gs	Permeabilitatea reversibilă la H_a B_a μ_{rev} Gs/Oe	Inducția remanentă B_r Gs	Cîmpul coerciv $_BH_c$ Oe	Cîmpul coerciv intrisec $_JH_c$ Oe	Densitatea g/cm³	Rezistivitatea ρ Ωmm²/ m	Intensitatea de polarizație magnetică la saturație J_s Gs
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
I											
1	F.R.M.	0,34	52	6800	22 ...28	9400	70	70	7,9	0,4	17 000
2	C.S.G.	1,1	380	3400	4,5... 5,5	5800	630	671	6,8	0,49	10 000
3	C.S.G.	1,5	420	3900	4... 5	6600	700	735	7,1	0,6	11 600
4	C.S.G.	1,8	440	4500	4 ... 5	7500	760	803	7,2	0,6	11 400
5	C.S.G.	1,9	570	3600	3 ... 4	6200	1000	1103	7,2	0,61	13 500
6	C.S.G.	3,3	700	5200	3 ... 4	8400	1150	1200	7,2	0,63	14 000
7	C.S.G.	3,8	470	9000	4 ... 5	11 200	610	611	7,2	0,6	15 000
8	C.S.G.	4,5	500	9500	4,5... 6	12 000	630	631	7,3	0,56	—
9	S.G.	0,8	850	1060	1,1...1,2	2 100	1650	—	4,8	$10^3/10^{13}$	4500
10	S.G.	2,5	1400	2 000	1,1...1,2	3500	1900	≈ 2110	4,9	$10^3/10^{10}$	4500
II											
1	C.G.	6,0	600	10 100	3,2	13 000	770	775	7,3	0	15 000
2	C.G.	8,1	710	11 500	1,1	13 300	820	825	7,6	—	—
3	F.R.M.	2,0	245	8100	7,5	9740	293	294	8,15	0,55	16 000
4	F.R.M.	0,45	250	1800	3,1	3090	429	458	8,65	0,19	5900
5	F.R.M.	0,91	270	3400	3,1	5200	420	502	8,65	0,19	—
6	F.R.M.	0,68	159	4270	6,9	6250	232	235	8,5	0,25	9750
7		0,89	225	3950	5,4	5890	335	341	8,5	0,26	9030
8		0,99	288	3450	4,4	5330	444	457	8,7	0,26	8570
9		0,88	333	2650	3,6	4390	549	580	8,7	0,29	7570
10		0,68	369	1838	2,7	3200	642	725	8,5	0,32	5760
11	P.G.	**1,3**	540	2400	3,0	4380	987	≈ 1200	—	300	6500
12	P.G.	4,3	**1810**	2380	1,01	4420	3360	—	—	—	—

2) F — forjare, R — laminare, M — așchiere, C — turnare, S — sinterizare, G — polizare, P — presare.
Materialele sînt definite suficient prin punctul de funcționare cel mai favorabil (B_a, H_a) sau după alți autori prin B_a, H_a și permeabilitatea reversibilă μ_{rev}.

2.6. MATERIALE IZOLANTE

Tabelul 2.16. **Rășini termoplastice**

Nr. crt.	Tipul	Materialul	Densitatea g/cm³	Rezistența la încovoiere kgf/cm²	Reziliența kgf cm/cm²	Reziliența cu crestătură kgf cm/cm²	Rezistența la tracțiune kgf/cm²	Modulul de elasticitate kgf/cm² × 10^{-6}	Punctul de înmuiere Vicat °C	Conductivitatea termică kcal/m h grd	Stabilitatea termică °C	Indicele de eroziune (tracking) comparativ [3])	Rigiditatea dielectrică kV/mm	Rezistivitatea de volum Ω cm	Permitivitatea (relativă) la frecvențele 50 Hz	800 Hz	10^6 Hz
1	PE	Polietilenă de înaltă presiune	0,917	800 [1])	f.r. [2])	f.r. [2])	–	0,001	60	0,29	80	KA 3 c	40	10^{17}	2,28	2,28	2,28
2	PE	Polietilenă de joasă presiune	0,960	800 [1])	f.r. [2])	f.r. [2])	250	0,014	65	0,41	95	KA 3 c	45	10^{17}	2,30	2,30	2,30
3	PP	Polipropilenă	0,906	450 [1])	f.r. [2])	5	330	0,012	85	0,19	105	KA 3 c	40	10^{17}	2,27	2,26	2,25
4	PVC 642	Policlorură de vinil cu reziliență mare	1,35	200	–	> 30	230	0,015	50	0,14	70		50	10^{12}	3,7	3,7	3,1
5	PS 502	Polistiren standard	1,05	1000	22	2,5	550	0,032	100	0,12	60	KA 2	50	10^{14}	2,5	2,5	2,5
6	AS	Polistiren + acrilnitril	1,07	1200	28	3,5	600	0,034	100	0,14	80	KA 3 c	40	10^{15}	3,0	2,9	2,9
7	ABS	Polistiren + acrilnitril + + budadienă	1,06	750 [1])	f.r. [2])	15	490	0,028	120	0,18	80	KA 3 b	33	10^{14}	4,5	4,4	3,7
8	PA	Poliamidă-6	1,12	950 [1])	f.r. [2])	5	600	0,032	>200	0,3	90	KA 3 c	34	10^{14}	4,3	4,1	3,6
9	PA	Poliamidă-6·6	1,14	850 [1])	f.r. [2])	5	570	0,017	250	0,22	110	KA 3 c	45	10^{15}	3,7	3,7	3,6
10	PA	Poliamidă-6·10	1.08	650 [1])	f.r. [2])	10	400	0,020	>200	0,19	105	KA 3 c	45	10^{15}	3,5	3,4	3,3
11	PA	Poliamidă-11	1,04	550 [1])	f.r. [2])	5	500	0,015	170	0,25	85	KA 3 c	45	10^{14}	3,7	3,7	3,6
12	PA	Poliamidă-12	1,01	570 [1])	f.r. [2])	8	470	0,014	140	0,21	80	KA 3 b	40	10^{15}	3,5	3,3	3,2
13	PUR	Poliuretan	1,21	600	f.r. [2])	2	600	0,012	180	0,3	90	KA 2	35	10^{15}	3,6	3,5	3,4
14	PC 300	Policarbonat	1,20	750 [1])	f.r. [2])	20	650	0,022	150	0,17	130	KA 1	25	10^{15}	3,0	3,0	3,0
15		Poliacetal	1,41	1100 [1])	80	7	650	0,030	150	0,27	85	KA 3 c	0	10^{1}	3,9	3,8	3,7
16	PMMA 528	Polimetilmetacrilat	1,18	1150	18		760	0,032	110	0,16	100	KA 3:	30	10^{15}	3,6	3,1	2,6
17	PTFE	Politetrafluoretilenă	2,20	190 [1])	f.r. [2])	13	200	0,004	110	0,21	250	KA 3 c	30	10^{17}	2,0	2,0	2,0
18	PCTFE	Politrifluoretilenă	2,10	540 [1])	f.r. [2])	8	320	0,009	80	0,10	155	KA 3 c	40	10^{17}	2,7	2,6	2,4
19	Ca 434	Acetat de celuloză	1,29	600 [1])	75	5	460	0,016	80	0,22	65	KA 3 b	33	10^{15}	5,1	4,8	4,1
20	CAB 411	Acetobutirat de celuloză	1,21	550 [1])	18	2	370	0,022	100	0,20	75	KA 3 c	36	10^{16}	4,0	3,8	3,4
21	PPO	Oxid de polifenilenă	1,06	1000 [1])	f.r. [2])	2	750	0,023	>200	0,28	110	KA 1	40	10^{17}	2,6	2,6	2,6
22		Polisulfonă	1,24	1200 [1])	f.r. [2])	3	750	0,023	195	0,21	155	KA 1	35	10^{17}	3,0	2,9	2,9
23	PETP	Tereftalat de polietilenă	1,38	1170 [1])	f.r. [2])	4	540	0,028	>250	0,25	120	KA 1	30	10^{17}	3,5	3,4	3,4

[1]) Rezistența la încovoiere limitată.
[2]) Fără rupere.

[3]) Pentru definirea indicilor de eroziune (tracking) ai materialelor izolante conform procesului KA, v. tabelul 2.16 bis.

Tabelul 2.16 (continuare)

Denumirea comercială

Nr. crt.	Materialul	Denumirea comercială (exemple)
1	Politilenă de înaltă presiune	Lupolen 18; Trolen
2	Polietilenă de joasă presiune	Hostalen G; Vestolen A; Lupolen 60
3	Polipropilenă	Hostalen PP, Vestolen P; Novolen
4	Policlorură de vinil	Vestolit; Vinoflex; Vinnol; Hostalit
5	Polistiren standard	Polystyrene VI; Vestyron; Trolitul VI
6	Polistern + acrilnitril	Luran; Vestoran
7	ABS	Novodur; Vestodur; Cycolac
8	Poliamidă-6	Ultramid B; Durethan BK
9	Poliamidă-6 · 6	Ultramid A; Maranyl; Zytel
10	Poliamidă-6 · 10	Ultramid S
11	Poliamidă-11	Rilsan BM
12	Poliamidă-12	Vestamid; Rilsan AM
13	Poliuretan	Direthan U
14	Policarbonat	Makrolon; Lexan
15	Poliacetal	Delrin; Hostaform C
16	Polimetilmetacrilat	Plexigum; Resarit
17	Politetrafluoretilenă	Hosraflon TF; Teflon
18	Politrifluoretilenă	Hostaflon C2; KEL-F
19	Acetat de celuloză	Cellidor A
20	Acetobutirat de celuloză	Cellidor B
21	Oxid de polifenilenă	PPO
22	Polisulfonă	
23	Tereftalat de polietilenă	Arnit AR

Tabelul 2.16 bis

Categoria	KA 1	KA 2	KA 3 a	Ka 3 b	KA 3 c
Numărul de picături	1...10	11...100	101	101	101
Adîncimea de eroziune, max., mm	—	—	peste 2	între 1 și 2	pînă la 1

Cifrele de mai sus reprezintă valori minime și **sînt** extrase din **nor**mele germane corespunzătoare.

Tabelul 2.17. **Comparație între proprietățile electrice și stabilitățile termice ale materialelor izolante standardizate**

	Permitivitatea (relativă) ε_r	Tangenta unghiului de pierderi tgδ	Rigiditatea dielectrică kV/mm	Stabilitatea termică °C
Ulei de transformator	2,2	0,004	20	95
Hîrtie electroizolantă	2,4	0,002	8	105
Preșpan	3,6	0,003	12	105
Hîrtie stratificată	4,0	0,030	15	120
Material format din rășini fenolice	4,0	0,300	8	120
Material format din rășină melaminică	6,0	0,500	8	105
Material format din rășină poliesterică	3,6	0,030	10	120
Polietilenă	2,3	0,0001	40	90
Polistiren	2,5	0,001	50	60
Poliamidă	3,7	0,025	40	100
Policarbonat	3,0	0,001	25	180
Folie de triacetat	4,0	0,014	120	120
Folie de poliester	3,1	0,002	160	125
Folie de policarbonat	3,0	0,003	170	130
Folie poliamidică	3,8	0,003	200	180
Rășină epoxidică de turnare	3,3	0,006	20	130
Rășină poliesterică de turnare	3,4	0,006	25	105
Porțelan	6,0	0,017	35	> 200
Aer	1,00058	—	45	—

Proprietățile electrice de mai sus sînt date la 20°C și 50 Hz pentru un strat cu grosimea de 1 mm sau 0,4 mm în cazul foliilor.

Tabelul 2.18.

Rășini termoreactive

Nr. crt.	Tipul	Rășina de bază	Materialul de umplutură	Densitatea	Rezistența la încovoiere	Reziliența	Reziliența cu crestătură	Rezistența la tracțiune	Stabilitatea termică Martens	Conductivitatea termică	Stabilitatea termică	Indicele de eroziune (tracking) comparativ [1])	Rigiditatea dielectrică	Rezisztivitatea de volum	Absorbția de apă
				g/cm³	kgf/cm²	kgf cm/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²	°C	kcal/m h grd	°C		kV/mm	Ω cm	mg
1	11,5		Pulbere de rocă	1,8	500	3,5	1,0	150	150	0,65	130	KA 1	10	10^{11}	45
2	12		Fibră de azbest	1,8	500	3,5	2,0	200	150	0,65	130	KA 1	4	10^{9}	60
3	13,9		Mică	1,9	500	3,0	2,4	200	150	0,60	130	KA 2	12	10^{12}	20
4	15		Fibre de asbest	1,8	500	5,0	5,0	200	150	0,60	130	KA 1	3	10^{8}	130
5	16		Șnur de azbest	2,0	700	15,0	15,0	250	150	0,65	130	KA 1	3	10^{8}	90
6	30,5		Făină de lemn	1,4	600	5,0	1,5	250	100	0,30	120	KA 1	15	10^{11}	200
7	31,5		Făină de lemn	1,4	700	6,0	1,5	250	125	0,27	120	KA 1	8	10^{11}	180
8	32		Făină de lemn	1,4	700	6,0	1,5	250	125	0,27	120	KA 1	5	10^{10}	180
9	51,5		Fibre de hîrtie	1,4	600	5,0	3,5	250	125	0,31	120	KA 1	8	10^{11}	300
10	52		Pastă	1,4	550	3,5	2,0	250	125	0,27	120	KA 1	6	10^{11}	100
11	54	Fenol	Tocătură de hîrtie	1,4	800	8,0	5,5	250	125	0,25	120	KA 1	5	10^{8}	500
12	57		Țesătură de hîrtie . ..	1,4	1200	15,0	10,0	400	125	0,25	120	KA 1	5	10^{8}	1500
13	77		Fibră de bumbac	1,4	600	6,0	6,0	250	125	0,32	120	KA 1	5	10^{8}	250
14	74,5		Pînză din cîlți de bumbac	1,4	600	12,0	12,0	250	125	0,29	120	KA 1	8	10^{11}	300
15	75		Mătase artificială	1,4	600	14,0	14,0	400	125	0,29	120	KA 1	5	10^{11}	300
16	77		Țesătură din cîlți de bumbac	1,4	800	25,0	18,0	600	125	0,29	120	KA 1	5	10^{8}	450
17	83		Făină de lemn și fibră de bumbac	1,4	600	5,0	3,5	250	125	0,30	120	KA 1	5	10^{9}	200
18	84		Pînză din cîlți de bumbac — fibră de tocătură de hîrtie	1,4	600	7,0	7,0	250	125	0,31	120	KA 1	5	10^{8}	150
19	130,5	Uree	Făină de lemn	1,5	700	6,0	1,2	250	100	0,31	80	KA 2	8	10^{11}	400
20	131,5	Uree	Pastă	1,5	800	6,5	1,5	300	100	0,31	80	KA 2	8	10^{11}	300
21	150		Făină de lemn	1,5	700	6,0	1,5	300	120	0,34	105	KA 3 b	5	10^{10}	250
22	152		Fibră de pastă	1,5	800	7,0	1,5	300	120	0,34	105	KA 3 b	8	10^{11}	200
23	153,5		Fibră de bumbac......	1,5	600	5,0	3,5	300	125	0,34	105	KA 3 b	8	10^{11}	300
24	154	Melamină	Pînză din cîlți de bumbac	1,5	600	6,0	6,0	300	125	0,34	105	KA 3 b	5	10^{8}	300
25	155		Pulbere de rocă	2,0	400	2,5	1,0	300	130	0,55	105	KA 3 c	5	10^{9}	200
26	156		Fibră de azbest	1,8	500	3,5	2,0	200	140	0,55	105	KA 3 c	3	10^{8}	200
27	157		Fibră de azbest + făină de lemn	1,7	600	4,5	1,5	250	140	0,45	105	KA 3 b	4	10^{9}	200
28	180	Melamină/	Făină de lemn	1,6	800	6,0	1,5		120		110	KA 3 a	8	10^{9}	180
29	181,5	fenol	Fibră de pastă	1,6	800	7,0	1,5		120		110	KA 3 c	5	10^{9}	150
30	182		Făină de lemn + pulbere de rocă	1,6	700	4,1	1,2		120		110	KA 3 b	6	10^{8}	120
31	801		Fibre de sticlă	1,7	600	22,0	22,0	450	125		120	KA 3 c	10	10^{12}	100
32	802		Fibre de sticlă	2,1	550	4,5	3,0	450	140		120	KA 3 c	10	10^{12}	45
33	803	Poliester	Fibre de sticlă	1,8	600	22,0	22,0		125		120	KA 3 c	10	10^{12}	100
34			Fibre textile	1,5	600	12,0	12,0		100		105	KA 3 c	6	10^{9}	250
35			Pînză tocată	1,5	400	8,0	8,0		100		105	KA 3 c	8	10^{9}	250
36	870		Pulbere de rocă	1,9	700	6,0	1,5		115	0,25	140	KA 3 b	18	10^{15}	20
37	871	Epoxi	Fibră de sticlă scurtă..	1,8	800	8,0	3,0		110	0,22	155	KA 3 b	15	10^{15}	20
38	872		Fibră de sticlă lungă ..	1,9	1200	16,0	15,0		120	0,18	155	KA 3 c	15	10^{15}	20
39		Silicon	Pulbere de cuarț	1,9	500	2,0	1,0	200	250	0,50	180	KA 3 c	10	10^{15}	40
40			Fibre de sticlă	1,8	600	30,0	25,0	200	250	0,50	180	KA 3 c	10	10^{16}	45

Rășini de turnare

Nr. crt.	Tipul	Rășina de bază	Materialul de umplutură	Densitatea	Rezistența la încovoiere	Reziliența	Reziliența cu crestătură	Rezistența la tracțiune	Stabilitatea termică Martens	Conductivitatea termică	Stabilitatea termică	Indicele de eroziune (tracking) comparativ	Rigiditatea dielectrică	Rezisztivitatea de volum	Absorbția de apă
41		Poliester	întărire la rece	1,2	1100	9,0	1,2	600	75	0,16	80	KA 2	30	10^{15}	35
42		Poliester	întărire la cald	1,3	1500	20,0	1,5	850	60	0,13	105	KA 3 c	25	10^{15}	35
43		Epoxi	întărire la rece	1,2	900	15,0	1,5	550	50	0,15	85	KA 3 c	20	10^{12}	50
44		Epoxi	întărire la cald	1,3	1400	16,0	1,5	600	95	0,15	125	KA 3 c	18	10^{14}	20
45		Metacrilat	întărire la cald	1,2	1200	15,0	1,5	700	90	0,16	120	KA 3 c	40	10^{14}	60

Cifrele de mai sus reprezintă valori minime extrase din standardele germane corespunzătoare.

[1]) V. nota [3]) de la tabelul 2.16.

Tabelul 2.19. **Materiale izolante anorganice**

Nr. crt.	Tipul	Materialul	Densitatea g/cm^3	Rezistența la tracțiune: glazurat kgf/cm^2	Rezistența la tracțiune: neglazurat kgf/cm^2	Rezistența la compresiune: glazurat kgf/cm^2	Rezistența la compresiune: neglazurat kgf/cm^2
1	KER 110,1		2,4	300	250	4500	4600
2	KER 110,2	Predominant silicat de aluminiu	2,5	600	450	5500	5500
3	KER 111		2,3			3000	2500
4	KER 220		2,6	600	450	8500	8500
5	KER 221	Predominant silicat de magneziu	2,8	600	450	9000	9000
6	KER 240		1,9				1000
7	KER 310	Oxid de titan	3,5		300		3000
8	KER 330	Titanați	4,0		300		3000
9	KER 350	Titanat de bariu	5,2				2000
10	KER 410	Silicat de magneziu și aluminiu	2,1		250		
11	KER 520	Silicat de magneziu	2,0		100		2500
12	KER 610	Oxid de aluminiu	2,6		400		7000
13	KER 712	Oxid de aluminiu	3,1				
14	KER 720	Oxid de magneziu	2,5				
15		Silicat de zirconiu	2,5				
16		Eucriptit	2,4				
17		Sticlă cu borosilicați	2,3				

Nr. crt.	Rezistența la încovoiere: glazurat kgf/cm^2	Rezistența la încovoiere: neglazurat kgf/cm^2	Reziliența $kgf\ cm/cm^2$	Conductivitatea termică $\frac{kcal}{mh\ grd}$	Rigiditatea dielectrică kV/cm	Rezistivitatea de volum Ωcm	Permitivitatea (relativă)	Tangenta unghiului de pierderi la 20°C și frecvențele: 50 Hz 10^{-3}	800 Hz 10^{-3}	10^6Hz 10^{-3}	Absorbția de apă %
1	600	400	1,8	1,4	350	10^{11}	6,0	17		6	0,55
2	1000	800	2,2	2,0	390	10^{12}	6,0	17		6	0,55
3		300	1,3	1,0							
4	1200	1200	3,0	2,0	200	10^{12}	6,0	2,5		1,5	0
5	1400	1400	4,0	2,0	300	10^{12}	6,0	1,0	0,8	0,3	0
6	1500	350	1,6	1,2			4,5			0,2	0
7		900	2,5	3,0	100		60		0,3	0,3	0
8		900	2,5		100		30		0,2	0,05	0
9		600	1,6		30		350			2,5	
10		500	1,8	1,7	100	10^{11}	5,0	20		4,0	0
11		500	1,8	1,1							3,0
12		1200	4,0	2,5	250	10^{12}	7,0				0
13		1200		9,5							5
14				7,0						0,6	10,0
15		900	2,0	2,9							9,0
16		1300		0,9	.300	10^{10}	28	200	200	100	0
17	800			1,0	220	10^{13}	4,6			5,5	0

Denumiri comerciale:

Nr. crt.	Materialul	Denumiri comerciale (exemple)
1	KER 110,1	Porțelan 1008, 1009; Porțelan tare; Melalith
2	KER 110,2	Predur; Karbowid 1203
3	KER 111	Porțelan presat; Porțelan tare
4	KER 220	Steatit
5	KER 221	Elit; Frequenta; Calit; Rosalit 7; Deltan
7	KER 310	Sirutit; Kerafar U; Rosalit 85; Condensa
8	KER 330	Konstit; Kerafar X; Rosalit 40; Tempa
9	KER 350	Sibatit; Vibrit
10	KER 410	Siematherm; Sipa H; Rosaltherm I
11	KER 520	Masă ceramică pentru aparate încălzitoare; Sipa 11; Rosaltherm III; Pyrostat
12	KER 610	Masă ceramică pentru pirometre; Degussit; Pythagorasmasse
13	KER 712	Sinterkorund
14	KER 720	Ceramică cu MgO
15		Ceramică cu zirconiu

Cifrele de mai sus reprezintă valori minime.

Tabelul 2.20. **Împărțirea materialelor izolante în clase de izolație** [1]) **conform publicației CEI 85**

Clasa		Materiale izolante	Lianți, materiale de impregnare sau acoperire [2]) folostie de producătorul materialelor izolante din coloana 3	Materiale de impregnare utilizate la tratarea echipamentelor izolate instalate
Y	Tabel principal	Bumbac Mătase naturală Lînă sintetică Mătase artificială Fibră poliamidică Hîrtie și produse din hîrtie Preșpan Fibră Lemn Rășină de anilină-formaldehidică Rășină carbamidică	fără	fără
	Tabel anexă	Poliacrilat Polietilenă Polistiren Policlorură de vinil cu sau fără plastifiant Cauciuc vulcanizat	fără	fără
A	Tabel principal	Bumbac Mătase naturală Lînă sintetică Mătase artificială Fibră poliamidică Hîrtie și produse din hîrtie Preșpan Fibră Lemn	fără	Lac bituminos Lac pe bază de rășini naturale sau sintetice, modificat cu ulei sicativ
		Materiale textile, impregnate cu lac, pe bază de bumbac, mătase naturală, mătase artificială sau fibră poliamidică Hîrtie lăcuită	Lac pe bază de rășini naturale sau sintetice modificat cu ulei sicativ	Șelac, copal și alte rășini naturale Soluții sau suspensii de celuloză, esteri și eteri
		Lemn stratificat	Rășină fenol — formaldehidică	Ulei izolant și fluide dielectrice sintetice
		Folie de acetat de celuloză Rășini poliesterice reticulate Email pentru conductoare pe bază de ulei sicativ și rășini	fără	
	Tabel anexă	Elastomeri policloroprenici Elastomeri butadien-acrilnitrilici	fără	nu sînt necesare

Tabelul 2.20 (continuare)

Clasa		Materiale izolante	Lianți, materiale de impregnare sau acoperire [2]) folosite de producătorul materialelor izolante din coloana 3	Materiale de impregnare utilizate la tratarea echipamentelor izolate instalate
E	Tabel principal	Email pentru conductoare pe bază de acetat de polivinil, poliuretan, rășini epoxidice sau poliamidice Rășini poliesterice reticulate Folie de acetobutirat Folie de policarbonat Folie de triacetat de celuloză	fără	Lacuri pe bază de rășini sintetice, de asemenea rășini poliesterice reticulate, modificate cu ulei, rășini epoxidice (temperatura de funcționare maximă admisibilă ⩾ 120°C)
		Piese formate cu umplutură de celuloză Stratificate din bumbac Stratificate din hîrtie	Rășini melamino-formaldehidice Rășini fenolform-aldehidice Rășini furfurol-fenolice	
		Materiale textile tratate	Tereftalat de polietilenă	
B	Tabel principal	Fibră de sticlă Azbest	fără	Lacur pe bază de rășini sintetice, de asemenea rășini poliesterice reticulate, modificate cu ulei, rășini epoxidice (temperatura de funcționare maximă admisibilă ⩾ 130°C)
		Țesături din fibră de sticlă lăcuită Azbest lăcuit	Lac pe bază de rășini sintetice, de asemenea modificat cu ulei	
		Produse din mica, cu sau fără material suport	Șelac, asfalt sau compus de bitum Lac pe bază de rășini sintetice, de asemenea rășini poliesterice reticulate, modificate cu ulei Rășini epoxidice Rășini alchidice	
		Emailuri pentru conductoare pe bază de politereftalat	fără	
		Fibră de sticlă stratificată Azbest stratificat Piese formate cu material de umplutură mineral	Rășină melamino-formaldehidice Rășini fenol-formaldehidice	
	Tabel anexă	Piese formate cu material de umplutură mineral	Rășini poliesterice reticulate	
		Polimonoclortrifluoretilenă Folie de tereftalat de polietilenă Fibră de tereftalat de polietilenă Folie cristalizată de policarbonat	fără	

Tabelul 2.20 (continuare)

Clasa		Materiale izolante	Lianţi, materiale de impregnare sau acoperire[2]) folosite de producătorul materialelor izolante din coloana 3	Materiale de impregnare utilizate la tratarea echipamentelor izolate instalate
F	Tabel principal	Fibre de sticlă Azbest	fără	Răşini alchidice, răşini epoxi, răşini reticulate poliesterice şi poliuretanice, răşini alchidice, siliconice (tempertură de funcţionare maximă admisibilă $\geq$ 155°C)
	Tabel anexă	Ţesături din fibră de sticlă lăcuită Azbest lăcuit Produse din mica, cu sau fără material suport	Răşini alchidice, răşini epoxi, răşini reticulate poliesterice şi poliuretanice, răşini alchidice, siliconice (temperatură de funcţionare maximă admisibilă $\geq$ 155°C)	
		Emailuri de conductoare pe bază de poli ster imidic sau tereftalat imidic şi emailuri de conductoare pe bază de politereftalat cu stabilitate termică mărită	fără	
H	Tabel principal	Fibre de sticlă Azbest	fără	Răşini siliconice (temperatura de funcţionare maximă admisibilă $\geq$180°C)
		Ţesături din fibră de sticlă lăcuite Azbest lăcuit	Răşini siliconice cauciuc siliconic (temperatura de funcţionare maximă admisibilă $\geq$ 180°C)	
		Produse din mica, cu sau fără material suport Fibră de sticlă stratificată Azbest stratificat	Răşini siliconice (temperatura de functionare maximă admisibilă $\geq$ 180°C	
	Tabel anexă	Cauciuc siliconic	fără	fără
		Email de conductoare pe bază de poliimidă pură	fără	Răşini siliconice (temperatura de funcţionare maximă admisibilă $\geq$ 180C°)

Tabelul 2.20 (continuare)

Clasa		Materiale izolante	Lianţi, materiale de impregnare sau acoperire[2]) folosite de producătorul materialelor izolante din coloana 3	Materiale de impregnare utilizate la tratarea echipamentelor izolate instalate
C	Tabel principal	Mică, porţelan şi alte materiale ceramice, sticlă, cuarţ (temperatura de funcţionare maximă este limitată de proprietăţile fizice şi tehnice)	fără	fără, sau lianţi anorganici, ca sticlă sau ciment
	Tabel anexă	Ţesături de fibră de sticlă, tratate Produse tratate din azbest, produse din mică	Răşini siliconice cu stabilitate termică mărită (temperatura de funcţionare maximă admisibilă > 225°C)	Răşini siliconice cu stabilitate termică mare (temperatura de funcţionare maximă admisibilă > 225°C)
		Politetrafluoretilenă (temperatura de funcţionare maximă admisibilă > 225°C)	fără	fără

[1]) Materialele din coloana 4 sînt utilizate de producătorii materialelor izolante din coloana 3. Materialele din coloana 5 sînt utilizate de producătorii maşinilor electrice pentru tratarea bobinelor şi a celorlalte părţi izolate. Pentru fiecare clasă de materiale izolante producătorul trebuie să aleagă pe acelea din coloana 5 care sînt adecvate utilizării, împreună cu cele din coloanele 3 şi 4 corespunzătoare aceleiaşi clase sau uneia superioare.

[2]) Utilizarea lianţilor şi materialelor de impregnare este foarte frecvent restrînsă datorită nu atît stabilităţii termice, ci altor factori, ca de ex. proprietăţile mecanice la temperatura de funcţionare. Astfel, de exemplu, anumite răşini epoxi şi poliesterice trebuie încadrate în unele cazuri în clasa A în cazul unor sarcini mecanice mari.

2.7. CONDUCTOARE ELECTRICE METALICE

Tabelul 2.21. **Rezistivitatea şi coeficientul de temperatură la 20°C, temperatura maximă de regim, punctul de topire**

Materialul	Rezistivitatea ρ $\Omega \cdot mm^2/m$	Coeficientul de temperatură $\alpha \cdot 10^3$/grd	Temperatura maximă de regim t_{max} °C	Punctul de topire t_s °C
Aluminiu				
Bronz (Cu cu 5 pînă la 10% aluminiu)	0,13–0,29	0,6–1,0		≈ 1037
Tras dur	0,0303			
Foarte pur	0,0265	4,3		659,7
Moale	0,02778	4,0		
Sîrmă (99,6%)	0,029	4,0		
Bismut	1,2	4,0		271 3
Alamă (60–70% Cu, restul Zn)	0,06–0,08	1,5		900–950
Sîrmă de alamă	0,07–0,08	1,0–1,2		
Cărbune	40–100	– 0,3...–0,9	400	>3500
Crom nichel				
CN 80 (80% Ni, 20% Cr, 0 pînă la 3% Fe)	1,12	0,14	1100–1150	≈ 1400
CN 20 (20% Ni, 25% Cr, 55% Fe)	0,97	0,44	950	≈ 1375
Constantan				
(54% Cu, 45% Ni, 1% Mn)	0,50	– 0,03 [1]	400	
Cupru				
Tras dur	0,0179			
Pentru conductoare	0,0178	3,92		
Foarte curat	0,017	4,2		1083
Moale	0,0175	3,82		
Ferropyr 1 AC7				
(85% Fe, 7% Al, 7% Co, 1% Mn + Si)	1,25	0,13	1000	≈ 1480
Ferropyr 2 AC7				
(90% Fe, 1% Co, 8% Al, 1% Mn + Si)	0,92	0,42	800	≈ 1480
Aur	0,023	3,8–4,0		>1063
Fier turnat	0,6–1,6			
Fier (99,0 pînă la 99,9%)	0,1–0,15	6,51–6,57		1535

Tabelul 2.21 (continuare)

Materialul	Rezistenţa specifică ρ $\Omega \cdot mm^2/m$	Coeficientul de temperatură $\alpha \cdot 10^3$/grd	Temperatură maximă de regim t_{max} °C	Punctul de topire t_s °C
Isabellin (84% Cu, 13% Mn, 3% Al)	0,50	– 0,024	400	
Kanthal A1 (67,5% Fe, 25% Cr, 5,5% Al, 2% Co)	1,45	0,014	1300	≈ 1500
Plumb	0,2065	3,9		327,43
Manganin				
(86% Cu, 12% Mn, 2% Ni)	0,42	0,01–0,02 [5]	300	≈ 960
Megapyr AC 30				
(65% Fe, 30% Cr, 5% Al)	1,40	0,07	1300–1350	≈1500
Megatherm	0,95	0,58	1050	≈1470
Mercur	0,968	0,8–0,9		– 38,87
Nichel	0,069	6,1–6,9	400	1455
Nichelină (67% Cu, 30% Ni, 3% Mn)	0,40–0,44	0,18–0,21	300	≈1230
Nichel-argint	0,35–0,41	0,07		
Platină	0,10–0,11	3,0–3,8	1500	1773,5
Aliaj pentru rezistenţe electrice				
306 (Cu, Mn, Sn)	0,32	$5 \cdot 10^{-3}$ [6]	300	
Tablă de fier	0,12	6,5		
Aliaj (1,0 pînă la 5% conţinut de Si, v. tab. 2.14)	0,25–0,68			
Argint	0,0165	3,8		960,5
Oţel	0,10–0,25	4,5–5		
Sîrmă de oţel	0,17	5,2		
Tantal	0,16	3,83		
Staniu	0,12	4,2–4,63		232
Tungsten	0,055	4,0	2000 [7]	3380
Zinc curat	0,61	4,19		419,47

[1]) Minimul rezistenţei, la 250°C.
[2]) Cuprul pentru conductoare va avea, la 20°C, max $\rho = 0{,}01784$. Densitatea se va calcula la 8,9 kg/dm³. Sîrma de cupru recoaptă ireproşabil conf. normelor internaţionale are, la 20°C, $\rho = 0{,}07124 = 1/58$ $\alpha = 0{,}00393 = 1/254{,}5$, densitatea 9,0 kg/dm³. Impurităţi în cantităţi mici pot modifica puternic aceste valori. Pentru calcule estimative de conductoare s-ar putea considera la cupru, ţinînd seama de încălzire, $\rho = 1:53$; la maşini electrice, $\rho = 1:50$ pînă la $1:46$.
La topirea unui metal, rezistenţa este aproximativ de două ori mai mare.
[3]) şi [4]) Minimul rezistenţei la circa 250°C, maximul la 5°C.
[5]) Maximul rezistenţei la 30...40°C.
[6]) Maximul retistenţei, la 20...50°C.
[7]) În gaz de protecţie.

Tabelul 2.22. **Greutatea și rezistența în curent continuu a sîrmelor de cupru, la 20° C**

Diametrul mm	Secțiunea mm^2	Masa kg/km	Rezistența Ω/km	Lungimea m/kg	Lungimea m/Ω	Diametrul mm	Secțiunea mm^2	Masa kg/km	Rezistența Ω/km	Lungimea m/kg	Lungimea m/Ω
0,6	0,283	2,52	61,9	397	16,2	3,57	10	88,9	1,78	11,25	563
0,8	0,503	4,47	34,8	224	28,7	4	12,57	111,8	1,39	8,9	720
0,9	0,636	5,66	27,6	177	36,2	4,52	16	142,2	1,11	7,03	898
1	0,785	6,99	22,3	143	44,3	5,64	25	222,1	0,714	4,5	1400
1,2	1,131	10,07	15,5	100	64,7	8	50	444,5	0,357	2,23	2800
1,83	1,5	13,33	11,86	75	84,4	11	95	845	0,188	1,184	5315
1,5	1,767	15,73	9,90	64	101	13,8	150	1333	0,119	0,752	8410
1,78	2,5	22,22	7,12	45	140	17,5	240	2115	0,0744	0,473	13 440
2	3,14	27,96	5,57	35,8	180	22,6	400	3556	0,0446	0,281	22 400
2,11	3,5	31,11	5,08	32,1	197	25,2	500	4445	0,0357	0,225	28 000
2,26	4	35,56	4,45	28,2	225	31,9	800	7110	0,0223	0,1405	44 850
2,76	6	53,34	2,96	18,75	338	35,7	1000	8890	0,0178	0,1125	56 200
3	7,07	62,9	2,48	15,9	403						

Seria de tensiune termoelectrică a metalelor

La stratul limită a două metale apare o tranziție de electroni, care produce un cîmp între suprafețele de contact. Aportul de energie la punctul de contact (punctul de sudură sau de lipire) mărește, prin încălzire, tensiunea de contact în comparație cu cea de la capetele reci ale conductoarelor.

Tensiunea termoelectrică între două metale reprezintă diferența dintre valorile indicate în mV în tabelul 2.23, raportate la platină ca punct neutru și la diferența de temperatură de 100°C.

Tabelul 2.23. **Seria de tensiune termoelectrică a metalelor**

Metalul	Tensiunea mV	Metalul	Tensiunea mV
Bismut	− 7,70	Argint	+ 0,67 ... + 0,79
Constantan	− 3,47... − 3,40	Cupru	+ 0,72 ... + 0,77
Cobalt	− 1,99 ... − 1,52	Oțel V2A	+ 0,77
Nichel	− 1,94 ... − 1,20	Zinc	+ 0,60 ... + 0,79
Mercur	− 0,07 ... + 0,04	Manganin	+ 0,57 ... + 0,82
Platină	0,00	Iridiu	+ 0,65 ... + 0,68
Grafit	+ 0,22	Aur	+ 0,56 ... + 0,80
Tantal	+ 0,34 ... + 0,51	Cadmiu	+ 0,85 ... + 0,92
Staniu	+ 0,4 ... + 0,44	Molibden	+ 1,16 ... + 1,31
Plumb	+ 0,41 ... + 0,46	Fier	+ 1,87 ... + 1,89
Magneziu	+ 0,4 ... + 0,43	Crom-nichel	+ 2,20
Aluminiu	+ 0,37 ... + 0,41	Antimoniu	+ 4,70 ...+ 4,86
Tungsten	+ 0,65 ... + 0,90	Silicon	+ 44,8
Rhodiu	+ 0,65	Tellur	+ 50,0

Utilizări. Punctele de lipire ale metalelor corespunzătoare sînt folosite ca termoelemente sau „termometre electrice", pentru măsurarea temperaturilor înalte, pentru observarea temperaturilor în locuri greu accesibile, ca „circuit termic" la fabricarea aparatelor sensibile pentru măsurarea curentului alternativ (v. tabelele 9.31 și 9.32).

Tabelul 2.24 **Cîteva termoelemente uzuale raportate la temperatura de 0°C**

Temperatura lipiturii calde	100°C	500°C	1000°C	1500°C
Perechea de metale	Tensiunea termoelectrică, în mV			
Fier-constantan	5,37	27,84	—	—
Cupru-constantan	4,25	27,40	—	—
Nichel-crom nichel	4,04	20,64	41,32	—
Platină-platină rhodiu (10%)	0,64	4,22	9,60	15,58

2.8. CONDUCTOARE ELECTRICE IONICE

Tabelul 2.25. **Seria electrochimică a elementelor în soluție apoasă** [1])

Semiceluloză	E_h V	Semiceluloză	E_h V	Semiceluloză	E_h V
Li/Li^+	− 3,045	Ca/Ca^{2+}	− 0,4026	$Pt(O_2)/OH^-$	+ 0,401
K/K^+	− 2,924	In/In^{3+}	− 0,338	Cu/Cu^+	+ 0,522
Ca/Ca^{2+}	− 2,87	Tl/Tl^+	− 0,3363	Te/Te^{3+}	+ 0,56
Na/Na^+	− 2,7109	Co/Co^{2+}	− 0,28	As/AsO_2^-	+ 0,58
Mg/Mg^{2+}	− 2,375	Ni/Ni^{2+}	− 0,23	$2\ Hg/Hg_2^{2+}$	+ 0,7961
Ce/Ce^{3+}	− 2,335	Mo/Mo^{3+}	− 0,2	Ag/Ag^+	+ 0,7996
Be/Be^{2+}	− 1,70	Sn/Sn^{2+}	− 0,1364	Pt/Pt^{2+}	+ 1,2
Al/Al^{3+}	− 1,66	Pb/Pb^{2+}	− 0,1262	$Pt(Cl_2)/Cl^-$	+ 1,3583
Mn/Mn^{2+}	− 1,029	$H_2/2\ H^+$	0,000	Au/Au^{2+}	+ 1,42
Zn/Zn^{2+}	− 0,7628	Sb/SbO^+	+ 0,212	$Pt(F_2)/F^-$	+ 2,87
Cr/Cr^{3+}	− 0,74	Bi/BiO^+	+ 0,32		
Fe/Fe^{2+}	− 0,409	Cu/Cu^{2+}	+ 0,3402		

[1]) E_h măsurat în condiții standard (25°C, 1 atm), în raport cu electrodul de hidrogen ca electrod de referință.

Măsurarea valorii *p*H

Valoarea *p*H se utilizează ca măsură a acidității soluțiilor apoase și se definește, după Sörensen, ca fiind logaritmul zecimal cu semnul minus al concentrației *c* a ionilor de hidrogen sau al activității *a* a ionului de hidrogen

$$pH \equiv -\log c_{H_2O^+} \quad \text{sau} \quad pH = -\log a_{H_2O^+}.$$

Aici $c_{H_2O^+}$ este concentrația ionilor de hidrogen în ioni-gram pe litru de soluție. Activitatea $a_{H_2O^+}$ este produsul între concentrația $c_{H_2O^+}$ și coeficientul de activitate $f_{H_2O^+}$

$$pH \equiv -\log a_{H_2O^+} = -(\log c_{H_2O^+} + \log f_{H_2O^+}).$$

Metode de măsurare

1) Metoda electrochimică utilizează electrodul de hidrogen, electrodul de chinhidronă, electrodul de sticlă, electrodul de antimoniu sau de bismut ca electrod de măsurare. Precizia metodei este de circa 0,01 pH.

2) Metoda colorimetrică care foloseşte soluţie indicatoare sau hîrtie indicatoare are o precizie de circa 0,1 pH.

Electrodul normal de hidrogen

Electrodul de hidrogen este format dintr-o placă acoperită cu un strat subţire de platină, care este cufundată într-un electrolit (acid) avînd o activitate a ionilor de hidrogen $a_{H_2O^+}$ (1 mol/litru) şi dincolo de care hidrogenul aflat la presiune parţială (p_{H_2}) de 1 at se degajă sub formă de băşici.

Electrozi de referinţă (electrozi secundari) măsuraţi în raport cu electrodul normal de hidrogen la 25°C:

Electrodul de calomel saturat	$E = +0,2376$ V;
Electrodul de calomel 1N	$E = +0,2797$ V;
Electrodul de calomel 0,1 N	$E = +0,3376$ V;
Electrodul de clorură de argint 0,1 N	$E = +0,2225$ V;
Electrodul de oxid de mercur 1N NaOH	$E = +0,0984$ V[1]).

Dependenţa de temperatură a electrodului de hidrogen

În combinaţie cu electrodul de calomel 0,1 N:

t	18°C	20°C	25°C	30°C	40°C
E	0,3380 V	0,3379 V	0,3376 V	0,3372 V	0,3360 V

Pentru celelalte temperaturi E se calculează prin interpolare după formula

$$E = 0,3376 - 2,78 \cdot 10^{-5}(t - 25) - 2,9 \cdot 10^{-6}(t - 25)^2.$$

Pentru condiţii standard (25°C, 1 atm) valoarea pH se poate obţine din relaţia

$$pH = \frac{\Delta E - 0,3376}{0,05914}.$$

ΔE este t. e. m. măsurată în volţi.

În combinaţie cu electrodul de clorură de argint 0,1 N:

t	18°C	20°C	25°C	30°C	40°C
E	0,2268 V	0,2256 V	0,2225 V	0,2192 V	0,2121 V

[1]) Pentru măsurări în regiunea puternic alcalină.

Pentru condiţii standard (25°C, 1 atm) valoarea pH se poate calcula cu relaţia

$$pH = \frac{\Delta E - 0,2225}{0,05914.}.$$

Tabelul 2.26. **Valorile pH ale soluţiilor standard, între 0° şi 95°C (Biroul Naţional de Standarde[1])**

t °C	Sol 0,05 M de tetroxalat de K	Tartrat de KH saturat la 25°C	Sol. 0,05 M de ftalat de KH	Sol. 0,025 M de KH_2PO_4 + 0,025 M de Na_2HPO_4	Sol. 0,01 M de borax
0	1,67	—	4,01	6,98	9,46
5	1,67	—	4,01	6,95	9,39
10	1,67	—	4,00	6,92	9,33
15	1,67	—	4,00	6,90	9,27
20	1,68	—	4,00	6,88	9,22
25	1,68	3,56	4,01	6,86	9,18
30	1,68	3,55	4,01	6,85	9,14
35	1,68	3,55	4,02	6,84	9,10
40	1,70	3,54	4,03	6,84	9,07
45	1,70	3,55	4,04	6,83	9,04
50	1,71	3,55	4,06	6,83	9,01
55	1,72	3,56	4,08	6,84	8,99
60	1,73	3,57	4,10	6,84	8,96
70	—	3,59	4,12	6,85	8,92
80	—	3,61	4,16	6,86	8,88
90	—	3,64	4,20	6,86	8,85
95	—	3,65	4,22	6,87	8,83

[1]) Din Anglia.

Tabelul 2.27. **Indicatori de pH cu gamă de variaţie a culorii**

Indicator	Gama de variaţie a culorii	Variaţia culorii la creşterea lui pH
Roşu de crezol, prima schimbare de culoare	0,2... 1,8	roşu-galben
Purpură de metacrezol	1,2... 2,8	roşu-galben
Galben de dimetil	2,9... 4,1	roşu-galben
Portocaliu de metil	3,1... 4,4	roşu-galben/portocaliu
Verde de bromfenol	3,8... 5,4	galben-albastru
Roşu de metil	4,2... 6,3	roşu-galben
Roşu de clorofenol	4,8... 6,4	gălben-roşu
Turnesol	5,0...8,0	roşu-albastru
Roşu de fenol	6,8... 8,4	galben-roşu
Roşu de crezol, a doua schimbare de culoare	7,2... 8,8	galben-roşu
Albastru de timol	8,0... 9,6	galben-albastru
Fenolftaleină	8,3...10,0	incolor-roşu
Timolftaleină	9,3...10,5	incolor-albastru
Galben de alizarină R	10,1...12,1	galben deschis-portocaliu
Tropaeolină O	11,1...12,7	galben-portocaliu

Legile lui Faraday

1. Cantitatea M (în grame) de material care se depune pe un electrod sau este extrasă din acesta este direct proporțională cu cantitatea de electricitate consumată,

$$M \approx It.$$

2. Cantitățile M (în grame) de materiale degajate sau depuse de diferiți electroliți de către aceeași cantitate de electricitate It sînt proporționale cu masele lor echivalente A (*masa echivalentă* este cîtul dintre masa atomică sau moleculară și valența electrochimică).

$$M = \frac{A}{F} It \text{ (unde } F \text{ este constanta lui Faraday).}$$

Pentru a separa sau a face să intre în reacție un echivalent gram dintr-un material (prin oxidare la anod sau prin reducere la catod) este necesară o cantitate de electricitate de

1 Faraday = 96 487,0 ± 1,6 C/echivalent-g = 26,802 Ah.

Valorile pH pentru cîteva soluții

Soluția	Scara pH	
Acid clorhidric 1 M = 1 mol/l (3,6% HCl)	0	
Acid clorhidric 0,1 M (0,36% HCl)	1	
	2	
Acid acetic (≈ 5% CH_3COOH)	3	acid
Apă de mlaștină	4	
	5	
	6	
Apă de rîu	7	neutru
Apă curentă	8	
Apă de mare	9	
	10	
Amoniac în apă 0,1 M (0,17% NH_3)	11	bazic
Apă calcaroasă saturată [0,17% $Ca(OH)_2$]	12	
Hidroxid de sodiu 0,1 M (0,4% NaOH)	13	

Rezistivitatea apei

Soluțiile apoase au o conductivitate mai scăzută decît metalele și conductivitatea lor depinde de conținutul de sare solubilă. În tabelul 2.28, se dă rezistivitatea apei la diferite temperaturi [pentru apă curentă pură (conținutul de săruri al apei curente variază local) și pentru apă care conține adaosuri de sodă].

Tabelul 2.28. **Rezistivitatea ρ a unei soluții de sodă la diferite temperaturi și diferite concentrații, MΩ mm²/mm**

Concentrația %	Temperatura, în °C								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 [1])	19,60	16,20	13,90	12,30	11,10	10,00	9,00	8,30	7,60
0,1	8,80	7,20	6,00	5,10	4,30	3,80	3,80	3,00	2,80
0,5	1,60	1,40	1,20	0,98	0,84	0,72	0,63	0,56	0,51
1	1,20	1,00	0,88	0,76	0,66	0,58	0,52	0,47	0,53
3	0,45	0,35	0,29	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,19
5	0,33	0,28	0,24	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13
10	0,21	0,17	0,15	0,13	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
20	0,15	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,055	0,05
25	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,045	0,04

[1]) Valorile pentru 0% se referă la apa curentă de la Berlin—Charlottenburg.

Rezistivitatea apei de ploaie depinde de cantitatea de materiale conductoare absorbite de ploaie. Rezistivitatea este mare dacă ploaia a căzut în aer liber curat; dar chiar în vecinătatea uzinelor ne putem încă aștepta la valori de 90 ... 100 MΩmm²/m.

Rezistența apei de mare corespunde groso-modo rezistenței unei soluții de 10% sodă.

2.9. MATERIALE SEMICONDUCTOARE

2.9.1. Definiții principale

Un semiconductor este un solid cristalin. Din punctul de vedere al conductivității electrice el ocupă o situație intermediară între metale și izolanți (dielectrici). Conductivitatea lui electrică depinde de temperatură, iar la temperatura zero absolut un semiconductor pur este un izolant.

Reprezentarea în plan din fig. 2.9, *a* a rețelei cristaline a germaniului se referă la un cristal semiconductor. Rețeaua cristalină este de tipul rețelei diamantului, la care fiecare atom este înconjurat de patru atomi vecini. Cuplarea cu acești patru atomi vecini se realizează prin patru perechi de *electroni de valență*. Pentru eliberarea electronilor din astfel de perechi, așa încît ei să se poată deplasa liber în cristal sub acțiunea

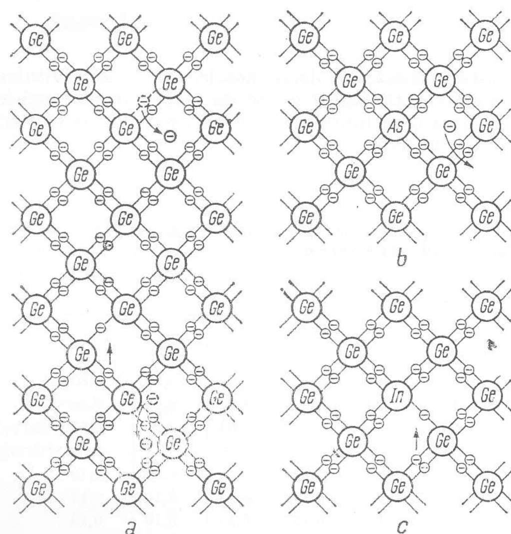


Fig. 2.9. Reţeaua cristalină a germaniului: *a* — mecanismul de conducţie; *b* — conducţia electronică sau de tip n; *c* — conducţia de tip p.

unui cîmp electric exterior (partea de sus a fig. 2.9, *a*) — deci ca semiconductorul să devină un conductor electric — este necesară o anumită energie care este caracteristică pentru fiecare semiconductor şi care se numeşte *interval de energie* ΔE.

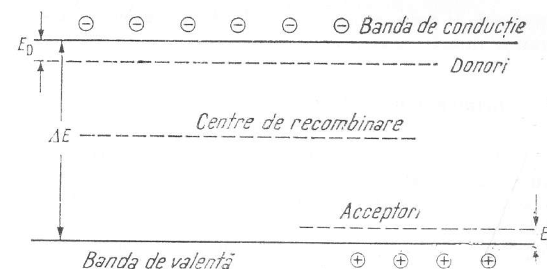
Locul liber care rezultă în punţile de electroni în urma eliminării unui electron, numit *gol* sau *lipsa de electron*, se poate deplasa într-un cîmp electric. Un electron situat în apropierea golului şi aflat sub influenţa cîmpului electric ocupă golul (fig. 2.9, *a*, partea de jos). De fapt golul s-a deplasat în acest caz în sens opus faţă de electron. Există două moduri de a imprima unui electron această energie:

Prin încălzirea cristalului. Agitaţia termică a atomilor face ca electronii individuali să se elibereze din legăturile lor. Concentraţia electronilor liberi şi deci conductivitatea creşte o dată cu temperatura. Acest fapt este utilizat în mod industrial la *termistor*.

Electronii şi golurile care apar prin încălzirea semiconductorului se găsesc în concentraţii egale, corespunzătoare *concentraţiei intrinsece*. Valoarea ei este de $2{,}4 \cdot 10^{13}$ electroni/cm³ pentru germaniu, $2 \cdot 10^{10}$ electroni/cm³ pentru siliciu şi $1{,}6 \cdot 10^{16}$ electroni/cm³ pentru antimoniura de indiu la temperatura camerei.

Prin iradierea cristalului, în care caz electronii sînt expulzaţi din legăturile lor prin cuantele de lumină, ale căror cuante de energie $h\nu$ trebuie să depăşească valoarea ΔE. Aplicaţii: fotorezistenţa (celula fotoconductivă) şi fotoelementul (celula fotoelectrică). La încetarea radiaţiei are loc recombinarea electronilor şi a golurilor. Scăderea concentraţiilor purtătorilor de sarcină este direct propoţională cu $e^{-t/\tau}$, unde τ este *durata de viaţă*. Recombinarea se produce de obicei prin intermediul centrilor de recombinare situaţi în apropierea mijlocului intervalului de energie ΔE (fig. 2.10). Dacă numai o mică parte din semiconductor este supusă iradierii, atunci purtătorii de sarcină difuzează în partea neiradiată. Acolo concentraţia lor scade direct proporţional cu $e^{-x/L}$, unde L se numeşte *lungimea de difuziune*.

Fig. 2.10. Modelul benzilor de energie.



În afară de încălzire şi de iradiere cu cuante de lumină există un alt mod de a atribui conductivitate electrică unui semiconductor. În cazul germaniului unii atomi — cu cei patru electroni de valenţă ai lor — sînt înlocuiţi cu atomi de arseniu avînd cinci electroni de valenţă (impurificînd cu o cantitate de arseniu germaniul topit înainte de solidificarea cristalului). Cel de al cincelea electron al atomului de arseniu, nemaifiind necesar pentru cuplarea atomului de arseniu cu atomii învecinaţi, se poate deplasa liber, ca *electron de conducţie*, în reţeaua cristalină a germaniului (fig. 2.9, *b*); în acest caz cristalul are *conductivitatea electronică* (prin sarcini *n*egative) sau de *tipul n*. Arseniul este un *donor* de electroni.

Dacă însă un atom de germaniu se înlocuieşte cu un atom de *indiu*, care are numai trei electroni de valenţă, atunci se produce un gol în vecinătatea atomului de indiu (fig. 2.9, *c*). Cristalul este de *tipul p* în acest caz şi are o *conductivitate de goluri* (prin sarcini *p*ozitive). Indiul este un *acceptor* de electroni.

Concentraţia de electroni sau goluri disponibile pentru transportul sarcinii este virtual identică cu cea a atomilor de impuritate adăugaţi. Spre deosebire de un metal, care are o rezistivitate tipică (bine definită), independentă de cantităţi mici de impurităţi, conductivitatea unui semiconductor poate fi stabilită şi reglată după cerinţă cu ajutorul unor adausuri foarte mici de impurităţi. Acest proces se numeşte *dopare* sau *dotare*.

Energia necesară pentru a smulge un electron dintr-un donor sau un gol dintr-un acceptor se numeşte *energia de activare* E_D sau E_A; în general E_D şi E_A sînt mici în comparaţie cu ΔE.

Nivelele de energie dintr-un semiconductor pot fi reprezentate cu ajutorul modelului benzilor de energie (fig. 2.10). Nivelele donorilor se găsesc imediat sub marginea inferioară a *benzii de conducţie*, iar nivelele acceptorilor se găsesc imediat deasupra *benzii de valenţă*.

În semiconductoare pure de germaniu şi siliciu vîrfurile reţelei cristaline sînt ocupate de atomi identici ai aceluiaşi element; în compuşii III—V însă, vîrfurile sînt ocupate alternativ de atomi ai unui element făcînd parte din grupa III a sistemului periodic (aluminiu, galiu, indiu) şi de atomi din grupa V (fosfor, arsen, antimoniu). În medie, fiecare atom al unui compus III—V conţine de asemenea $3/2 + 5/2 = 4$ electroni de valenţă, exact ca şi semiconductoarele formate din elemente pure. În mod corespunzător atomii au exact acelaşi aranjament geometric ca şi în germaniu şi siliciu. Pentru a introduce electroni suplimentari într-un compus III—V, el poate fi dotat, de exemplu, cu seleniu sau telur. Aceste elemente conţin un electron de valenţă în plus faţă de elementele din grupa a cincea şi servesc ca donori. Astfel, prin dotarea cu zinc sau cadmiu a reţelei cristaline a unui element din grupa III se obţine un deficit de

electroni, şi prin urmare o conducţie de goluri, ca şi în cazul semiconductorului de germaniu dotat cu indiu.

Semiconductorul omogen

Atunci cînd un semiconductor cu electroni de conducţie avînd concentraţia n, sau cu goluri avînd concentraţia p, se introduce într-un cîmp electric, electronii se deplasează cu o viteză $v = \mu E$ în direcţia cîmpului. *Mobilitatea* μ reprezintă viteza într-un cîmp avînd intensitatea de 1 V/cm. *Rezistivitatea* ρ poate fi determinată cu ajutorul dispozitivului arătat în fig. 2.11, prin măsurarea tensiunii U_R în lipsa cîmpului magnetic:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{en\mu_n} \quad \text{în semiconductorul de tip } n;$$

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{ep\mu_p} \quad \text{în semiconductorul de tip } p,$$

unde: e este sarcina elementară;
μ_p — mobilitatea golurilor;
μ_n — mobilitatea electronilor;
γ — conductivitatea.

La apariţia inducţiei magnetice B rezistivitatea creşte la valoarea ρ_B. *Rezistenţa relativă* $R_B/R_0 = \rho_B/\rho_0$ este mărimea fundamentală care caracterizează o *sondă magnetorezistivă*. În cîmpurile slabe $(\rho_B - \rho_0)/\rho_0 \sim B^2$, unde ρ_B este independent de semnul lui B. În afară de aceasta, se poate măsura *tensiunea Hall* U_H într-un cîmp magnetic conform următoarei legi

$$U_H = R_H \frac{i}{d} B,$$

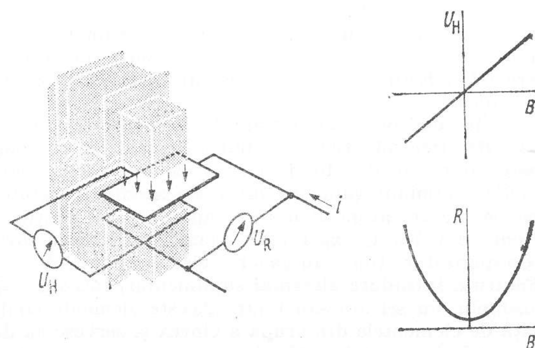


Fig. 2.11. Măsurarea tensiunii U_R.

unde d este grosimea stratului semiconductor, iar R_H este constanta lui Hall:

$$R_H = -\frac{C}{en} \quad \text{pentru semiconductoare de tip } n$$

$$R_H = \frac{C}{ep} \quad \text{pentru semiconductoare de tip } p.$$

Factorul de proporţionalitate C diferă foarte puţin de 1.

Concentraţiile purtătorilor de sarcini pot fi determinate prin măsurarea *constantei Hall* R_H.

Efectul Hall este utilizat în generatorul Hall.

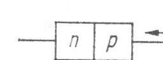
Dacă pe lungimea unui semiconductor există o diferenţă de temperatură, se poate măsura între extremităţile semiconductorului o tensiune electrică numită *tensiunea termoelectrică*. Aceasta din urmă este utilizată în *generatorul termoelectric* pentru convertirea directă a energiei termice în energie electrică. Pe de altă parte, cînd un curent trece printr-un semiconductor se produce o diferenţă de temperatură între extremităţile sale, care poate fi utilizată pentru *răcirea termoelectrică*.

Semiconductoare cu joncţiuni p—n

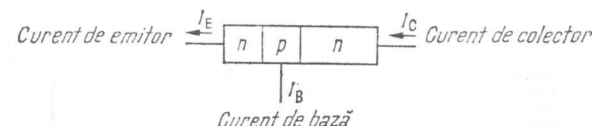
Atunci cînd un semiconductor se dotează astfel încît o parte din el să aibă conductivitate de tip n, iar restul conductivitate de tip p, suprafaţa de separare a celor două părţi constituie o *joncţiune* $p-n$. Ea prezintă o rezistenţă mică faţă de curent într-un sens şi o rezistenţă mare în celălalt sens, putînd să redreseze un curent alternativ. Cînd se aplică o tensiune de polarizare apare un *strat de sarcină spaţială*. Din fig. 2.12 se vede că diodele, tranzistoarele şi tiristoarele sînt formate din zone dotate în mod diferit şi avînd între ele joncţiuni $p-n$.

Cînd se injectează unei joncţiuni $p-n$ din arseniură de galiu un curent în sensul direct, are loc o emisie de lumină; aceasta are lungimea de undă de circa 0,9μm la intensitatea mică a curentului, joncţiunea constituind o *diodă luminescentă*; ea constituie o *diodă laser* atunci cînd curentul are intensitatea mare. Prin dotare intensă se obţine o *diodă tunel* a cărei caracteristică curent-tensiune este parţial negativă.

Diodă:



Tranzistor n-p-n



Tiristor:

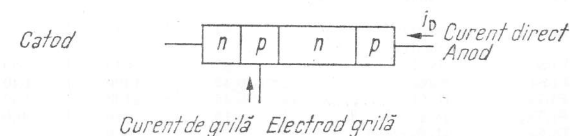


Fig. 2.12. Comparaţia între diodă, tranzistor şi tiristor.

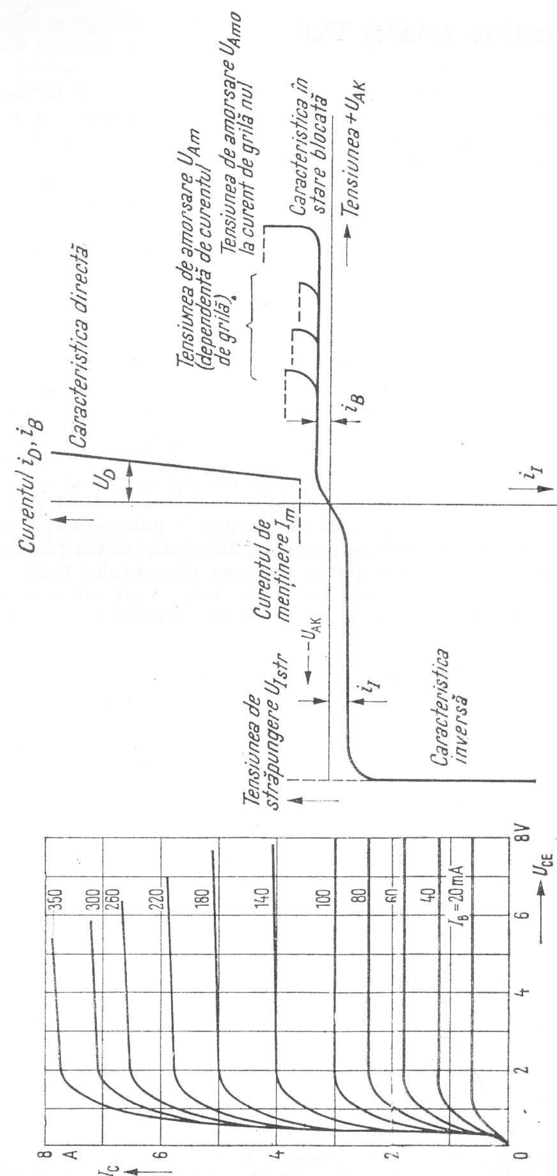
Joncţiunile $p-n$ din siliciu sau germaniu cu rezistenţă ridicată sînt folosite ca detectoare de radiaţie pentru înregistrarea şi măsurarea energiei particulelor β, protonilor şi particolelor α.

În fig. 2.13 sînt reprezentate caracteristicile unui tranzistor de siliciu în circuit de emitor: curentul de colector I_C ca funcţie de tensiunea U_{CE} dintre colector şi emitor, pentru diferite valori ale curentului de bază I_B.

În fig. 2.14 sînt reprezentate curbele tipice ale caracteristicilor curent-tensiune ale unui tiristor. Acesta este la început blocat în ambele sensuri, astfel încît chiar la tensiuni ridicate U_{AK} între anod şi catod nu pot circula decît curenţi mici (curentul de blocare i_B sau curentul invers i_I). După cum arată caracteristica directă din primul cadran al diagramei din fig. 2.14, la o anumită tensiune de amorsare U_{Am} tiristorul este amorsat spre caracteristica directă. Aceasta din urmă arată relaţia dintre tensiunea directă U_D şi curentul direct i_D, linia dreaptă din fig. 2.14. Tensiunea de amorsare U_{Am} este determinată de curentul de grilă.

Tabelul 2.29. **Caracteristicile fizice ale cîtorva semiconductoare**

Semiconductorul	Structura	ΔE la 0°K eV	μ_n $\frac{cm^2}{Vs}$ la temperatura camerei	μ_p $\frac{cm^2}{Vs}$ la temperatura camerei	Utilizări industriale
Si	De diamant	1,12	1900	425	Redresor, celulă solară, detector de radiaţii, tranzistor, tiristor
Ge	De diamant	0,78	3900	1700	Redresor, detector de radiaţii, tranzistor
Ge-Si		0,78–1,12			Generator termoelectric
Se	Hexagonală	1,6–1,9		≈1	Redresor
AlSb	Blendă de zinc	1,65	150	400	
GaP	Blendă de zinc	2,33	> 100	150	Diodă luminescentă
GaAs	Blendă de zinc	1,52	7000	450	Diodă tunel, diodă luminescentă, laser
GaSb	Blendă de zinc	0,8	4000	2000	
InP	Blendă de zinc	1,42	4500	150	Filtru de infraroşu
InAs	Blendă de zinc	0,43	27 000	450	Filtru de infraroşu, generator Hall
InSb	Blendă de zinc	0,24	76 000	760	Filtru de infraroşu, detector de infraroşu, generator Hall, sondă magnetorezistivă
Cu_2O	Cuprit	2,06		100	Redresor
ZnO	Wurtzit	3,2	200		
ZnS	Wurtzit Blendă de zinc	3,5–3,8			Substanţe fluorescente
ZnSe	Blendă de zinc	2,8			Substanţe fluorescente
CdS	Wurtzit	2,5			Fotorezistenţă, dozimetru pentru raze X
CdSe	Wurtzit Blendă de zinc	1,84	240		Fotorezistenţă
PbS	NaCl	0,37	640	350	Fotoelemente
PbSe	NaCl	0,45	1400	640	Fotoelemente
PbTe	NaCl	0,45	2100	840	Fotoelemente
Bi_2Te_3	Hexagonal	0,15	310	400	Răcire termoelectrică
Bi_2Se_3	Hexagonal	0,28	600		Răcire termoelectrică



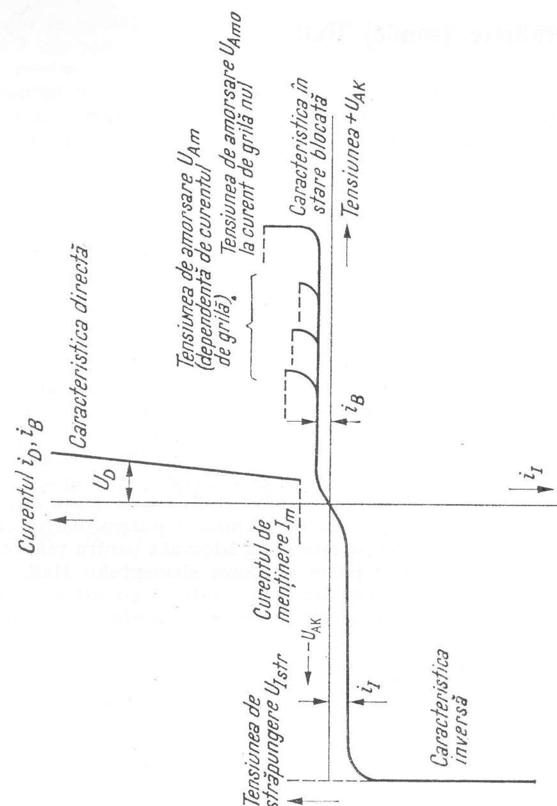


Fig. 2.14. Caracteristicile curent-tensiune ale unui tiristor.

Fig. 2.13. Caracteristicile unui tranzistor cu siliciu, în circuitul emitorului.

2.9.2. Generatoare (sonde) Hall

Generatorul Hall este un element semiconductor care poate fi influenţat magnetic şi care serveşte la utilizarea tehnică a efectului Hall; el se utilizează la măsurarea cîmpurilor magnetice, la multiplicarea analogică, la indicarea fără contact a poziţiei şi la citirea datelor înmagazinate magnetic.

Există numeroase tipuri constructive deosebindu-se, atît din punctul de vedere al materialului cît şi al construcţiei, pentru a adapta generatorul la diferite aplicaţii posibile.

Execuţia deschisă (fig. 2.15, *a*): elementul Hall *1* este fixat pe o placă suport subţire nemagnetică şi este protejat numai printr-o peliculă *5* din lac izolant sau răşină epoxidică. Această formă constructivă este destinată măsurării cîmpurilor magnetice din întrefieruri înguste. Printre variante se numără tipul în formă de limbă şi sonde pentru cîmp axial.

Execuţia închisă (fig. 2.15, *b*); elementul Hall *1* este protejat de o cutie formată din placa de bază *2*, rama *3* şi un capac *4*. Cutia este din Al_2O_3. Se utilizează ca sondă de precizie pentru măsurarea cîmpului în întrefieruri care depăşesc 2 mm. Printre variante se numără sonda pentru cîmp tangenţial (cu elementul Hall *1* în partea frontală) şi sonda multiplă pentru măsurarea gradienţilor de cîmp. Răcirea se face numai pe o singură faţă şi anume pe placa de bază (tipul se marchează pe capac).

Construcţia sandviş (fig. 2.15, *c*): elementul Hall *1* este fixat direct între placa de bază şi capac, ambele din Al_2O_3, ceea ce permite o putere mărită cînd răcirea se face pe ambele feţe. Această construcţie este ideal adecvată pentru măsurarea cîmpului în întrefieruri care nu depăşesc decît puţin grosimea elementului Hall.

Variante: placa de bază şi capacul din ferită; într-un circuit magnetic închis are o sensibilitate mare faţă de fluxul magnetic, deoarece întrefierul efectiv este egal cu grosimea elementului Hall.

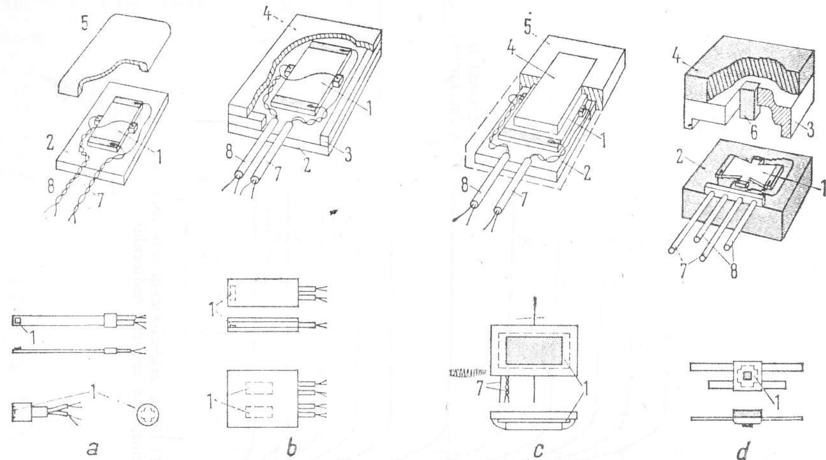


Fig. 2.15. Tipuri constructive de generatoare Hall:
1 element Hall; *2* – placă suport; *3* – ramă nemagnetică; *4* – capac; *5* – capac lăcuit sau din răşină epoxi; *6* – bară de ferită; *7* – conexiunile curentului de comandă; *8* – conexiunile Hall.

Construcţia în formă de bară (fig. 2.15, *d*): fluxul magnetic la care sînt supuse plăcile din ferită *2* şi *4* este concentrat în mijlocul elementului Hall *1* cu ajutorul barei feromagnetice *6*; puntea *3* este nemagnetică (Al_2O_3). Construcţia este destinată sondelor Hall de tipul cu ferită, sensibile la fluxul magnetic. Variantă: sondă miniaturală pentru indicarea poziţiei bobinelor.

Termeni şi definiţii

Conexiuni, identificarea conexiunilor [1])

S o n d e H a l l c u s î r m e e m a i l a t e r ă s u c i t e

Cele două conexiuni Hall (galben-roşu) şi cele două conexiuni ale curentului de comandă (verde-violet) sînt întotdeauna răsucite împreună.

S o n d e H a l l c u s î r m e e m a i l a t e r ă s u c i t e î n t u b u r i i z o l a n t e

Tubul albastru pentru tensiunea Hall, tubul roşu pentru curentul de comandă.

S o n d e H a l l c u c o n e x i u n i i z o l a t e ş i a r m a t e c u t r e s ă

Conexiunile Hall albastru-roşu, conexiunile curentului de comandă galben-negru.

S o n d e H a l l c u s î r m e n e i z o l a t e

Tensiunea Hall – sîrme scurte, curentul de comandă – sîrme lungi.

S o n d e H a l l c u p a p u c i l i p i ţ i: vezi date de catalog [1])

P ă r ţ i c u c o n e x i u n i n u m e r o t a t e:

1–2 curentul de comandă;
3–4 tensiunea Hall;
5–6 } bobinaje de excitaţie.
7–8 }

Pentru atribuirea polarităţilor v. fig. 2.16.

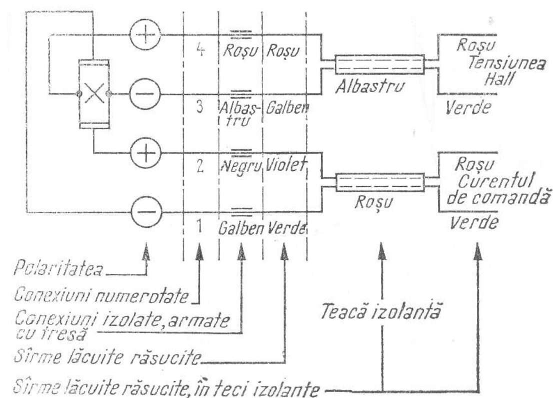


Fig. 2.16. Polarităţile tensiunii Hall şi curentului de comandă la diferite execuţii. Cîmpul magnetic traversează sonda Hall în direcţia → capac (pe care e marcat tipul) sau strat de lac → element Hall → placă suport.

Curentul de comandă i_1

Este curentul care circulă în elementul Hall şi produce tensiunea Hall atunci cînd elementul este traversat în acelaşi timp de un cîmp magnetic.

[1]) Pentru sondele Hall produse de firma Siemens.

7 – Memoratorul inginerului electrician – c. 1794

În cazul aplicaţiilor care necesită un curent de comandă constant, trebuie să se ţină seama de un curent de comandă indus care apare datorită efectului cîmpului magnetic asupra lui R_1 (v „Rezistenţe").

Curentul de comandă maxim i_{1max}:

Curentul de comandă necesar pentru atingerea încălzirii maxime admisibile ΔT_{max}[1]; se indică de obicei pentru funcţionarea în aer liniştit. Dacă i_{1max} se depăşeşte fără răcire specială, se poate produce distrugerea elementului Hall datorită supraîncălzirii

Curentul de comandă maxim cu răcire suplimentară:

În general, curentul de comandă i_1 poate fi calculat cu ajutorul valorii rezistenţei termice care se indică în catalog pentru răcire specială

$$i_{1\,max} \sqrt{\frac{\Delta T_{max}}{R_{10B} R_t}},$$

unde:

$i_{1\,max}$ este curentul de comandă maxim, în A;
R_t — rezistenţa termică, în grd/W.
R_{10B} — valoarea maximă a rezistorului de comandă, la un anumit regim de funcţionare, în Ω;
ΔT_{max} — încălzirea maximă admisibilă a elementului Hall, în grd[1]).

La $\Delta T_{max} = 15$ grd curentul de comandă nominal se obţine pentru condiţiile de răcire corespunzătoare lui R_t.

Curentul de comandă sub formă de impuls:

Dacă se utilizează un curent de comandă sub formă de impuls, valoarea maximă poate fi considerabil depăşită şi anume:

— la un singur impuls

$$i_{1P} = \sqrt{\frac{\Delta T_{max} C_t}{R_{10B} \Delta t}}$$

— la impulsuri periodice

$$i_{1F} = \sqrt{\frac{\Delta T_{max}}{R_{10B} R_t} \frac{1 - e^{-\frac{1}{f C_t R_t}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{C_t R_t}}}}$$

unde:

i_{1P} şi i_{1F} sînt curenţii de comandă sub formă de impuls, în A;
C_t este capacitatea termică, în Ws/grd; $C_t = cAd\rho$;
c — căldura specifică a materialului semiconductor, în Ws/grd (v. tab. 2.30);
A — suprafaţa elementului Hall, în cm²;
d — grosimea elementului Hall, în cm;
ρ — densitatea materialului semiconductor, în g/cm³ (v. tab. 2.30);
Δt — durata impulsului, în s;
f — frecvenţa de repetare, în Hz ($= s^{-1}$).

Curentul de comandă nominal i_{1n}:

Valoarea eficace a curentului de comandă care produce o încălzire de circa 15°C într-un element Hall care funcţionează în regim staţionar în aer liniştit şi este supus

[1]) Dacă nu se specifică altfel, $\Delta T_{max} = 30°C$

la valoarea de referinţă a mărimii magnetice de măsurat (v. de asemenea „Valori de referinţă pentru mărimile magnetice de măsurat").

În cataloage se indică de obicei 10 kGs ca valoare de referinţă a inducţiei magnetice. Dacă sonda Hall urmează a fi utilizată la x [kGs] ($x > 15$ kGs) curentul de comandă trebuie să fie redus de la i_{1n} la i_{1nx}, din cauza influenţei cîmpului magnetic asupra rezistenţei R_1 (v „Rezistenţe"),

$$i_{1nx} = i_{1n} \sqrt{\frac{R_{10n}}{R_{10x}}},$$

unde:

$i_{1\,nx}$ este curentul de comandă nominal la $B = x$ [kGs],
$R_{10\,n}$ — valoarea lui R_{10} la $B = B_n$;
$R_{10\,x}$ — valoarea lui R_{10} la $B = x$ [kGs].

Valoarea eficace maximă admisibilă a curentului de comandă de înaltă frecvenţă $i_{1\,ef\,max}$ a sondei Hall într-un cîmp magnetic staţionar:

$$i_{1\,ef\,max} = i_{1\,max} (f = 0)$$

pentru sonde Hall cu capac nemagnetic;

$$i_{1\,ef\,max} < i_{1\,max} (f = 0)$$

pentru sonde Hall pe material feromagnetic la frecvenţe de peste 300 kHz ale curentului de comandă (fig 2.17).

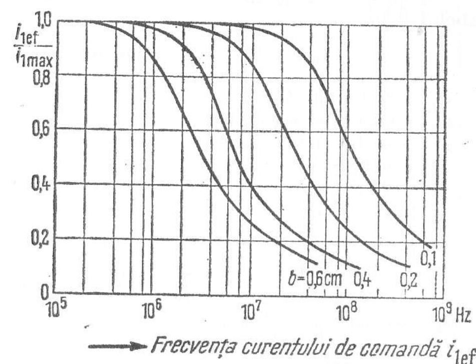


Fig. 2.17. Curentul de comandă alternativ maxim în funcţie de frecvenţă şi de lăţimea b a elementului Hall pentru o sondă situată în cîmp staţionar.

Curentul de comandă continuu pentru sonde Hall în cîmp magnetic alternativ de înaltă frecvenţă:

Din cauza pierderilor suplimentare prin curenţi turbionari în elementele Hall, trebuie să se reducă valoarea maximă a curentului de comandă i_{1max} care era valabil pentru cîmpuri staţionare.

În fig 2.18 este reprezentat curentul de comandă admisibil i_1 pentru un element Hall din InSb, avînd dimensiunile $a \cdot b \cdot d = 6 \cdot 3 \cdot 0{,}1$ mm³, fixat între două plăci de ferită, în funcție de frecvența cîmpului, la diferite amplitudini ale acestuia. Pentru o sondă Hall dată există o frecvență limită f_l (punctul la care curba curentului intersectează axa absciselor). La depășirea lui f_l elementul Hall poate fi distrus chiar la $i_1 = 0$.

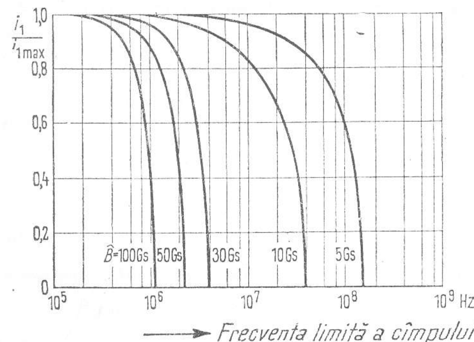


Fig. 2.18. Curentul de comandă continuu maxim i_1 pentru sonde Hall în cîmp alternativ, în funcție de frecvență și de amplitudinea cîmpului magnetic.

Într-un element Hall fără carcasă din ferită pierderile prin curenți turbionari sînt și mai mari, deoarece lipsește amortizarea cîmpului autoindus prin curenții turbionari.

Mărimi magnetice de măsurat

v. „Valori de referință pentru mărimi magnetice de măsurat".

Mobilitatea electronilor μ_n

O proprietate a materialului funcție de temperatură. Valorile lui μ_n sînt date în tabelul 2.30.

Tabelul 2.30. **Proprietățile fizice ale aliajelor InSb, InAs și InAsP**

R_H — coeficientul Hall
α_n — mobilitatea electronilor
μ — coeficientul de temperatură al rezistivității
β — coeficientul de temperatură al lui R_H sau al tensiunii Hall în gol U_{20}
γ — conductivitatea
η_H — randamentul Hall
ρ — densitatea
c — căldura specifică

Materialul	R_H cm³/As	μ_n cm²/Vs	α %/grd	β %/grd	γ S/cm	η_H %	ρ g/cm³	c Ws/g · grd
In Sb	380	76 000	−1,2	−1,5	200	16	5,7	0,223
In As	100	23 000	0,2	−0,07	230	7	5,5	0,27
	10	12 000	0,15	−0,01	1200	1,5		
$In(As_{0,8}P_{0,2})$	180	10 000	0,2	−0,04	55	4	5,4	0,273

Răspunsul la frecvență

Tensiunea Hall urmărește fără întîrziere atît un curent de comandă de înaltă frecvență, cît și un cîmp magnetic de înaltă frecvență.

Amplitudinea tensiunii Hall nu este influențată de frecvență:

a) la excitarea cu curent de înaltă frecvență;

b) în cazul sondelor Hall cu capac nemagnetic situate într-un cîmp magnetic de înaltă frecvență.

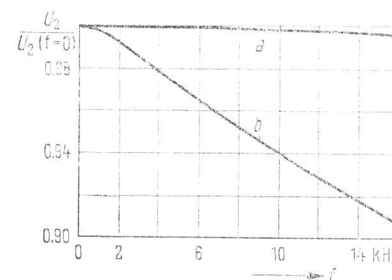


Fig. 2.19. Frecvența în funcție de amplitudinea tensiunii Hall:
a — Sondă Hall în miez de ferită (RMY 10);
b — Sondă Hall MB 26 în miez din mumetal E J 38.

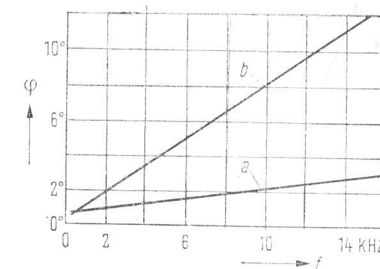


Fig. 2.20. Defazajul dintre curentul de excitație și tensiunea Hall:
a — Sondă Hall în miez de ferită (RMY 10);
b — Sondă Hall MB 26 în miez din mumetal JE 38

Amplitudinea este influențată de frecvență în cazul sondelor Hall cu ferită introduse în circuite magnetice închise, corespunzător răspunsului la frecvență al materialului feromagnetic utilizat. De asemenea se produce un defazaj în cîmpul magnetic între curentul de excitație al acestuia și tensiunea Hall respectivă (v. fig. 2.19 și 2.20).

Coeficientul Hall R_H

Coeficientul Hall R_H este o constantă de material care depinde de temperatură (fig. 2.21) și care pînă la inducții de 150 kGs nu este influențată de cîmpul magnetic în cazul arseniurii de indiu (InAs) și arseniurii-fosfurii de indiu (InAsP), pe cînd în cazul antimoniurii de indiu (InSb) ea este influențată de acest cîmp începînd de la circa 50 kGs.

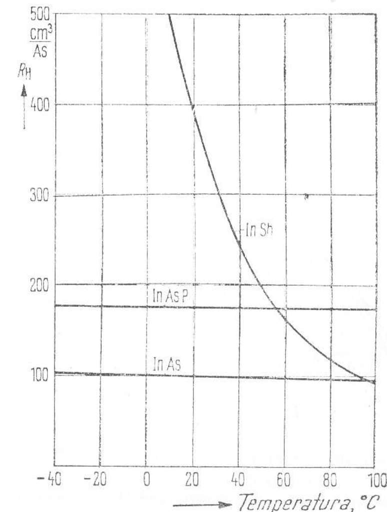


Fig. 2.21. Influența temperaturii asupra coeficientului Hall.

Efectul Hall

Dacă un curent i_1 parcurge în direcția x un conductor electric avînd forma unei benzi de grosime d (fig. 2.22) și în același timp acest conductor se găsește într-un cîmp de inducție B avînd direcția z, apare o tensiune Hall în gol U_{20} în direcția y, între punctele 3 și 4.

Ecuația lui Hall:

$$U_{20} = \frac{R_H}{d} i_1 B,$$

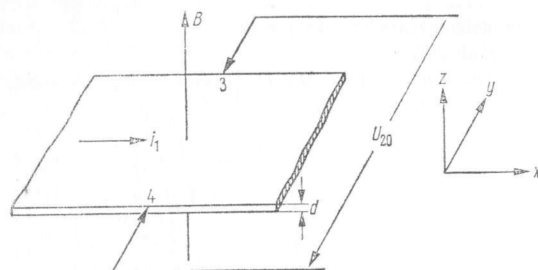


Fig. 2.22. Efectul Hall.

unde: U_{20} este tensiunea Hall în gol, în V;
R_H — coeficient Hall, în cm^3/As;
i_1 — curentul de comandă, în A;
d — grosimea conductorului, în cm;
B — inducţia, în Vs/cm^2.

Elementul Hall sau „sistemul electric".

Este format din plăcuţa semiconductoare a sondei Hall împreună cu electrozii pentru curentul de comandă şi cei pentru tensiunea Hall (fig. 2.23).

Elementul Hall cristalin: plăcuţa semiconductoare se obţine prin tăierea, polizarea şi decaparea unor bare din material semiconductor topit; grosimea de 5 ... 100 μm.

Elementul Hall obţinut prin depunere de vapori: o peliculă semiconductoare se depune prin evaporare pe o placă suport; grosimea de circa 2 ... 3 μm.

Tensiunea Hall

Ecuaţia Hall $U_{20} = \frac{R_H}{d} i_1 B$ se aplică numai unui conductor care este infinit de lung în direcţia curentului de comandă şi în cazul electrozilor punctiformi. În cazul elementelor Hall infinit de lungi şi avînd electrozi infiniţi se aplică relaţia:

$$U_{20} = \frac{R_H}{d} i_1 B G_H(a/b,\ s/a,\ B).$$

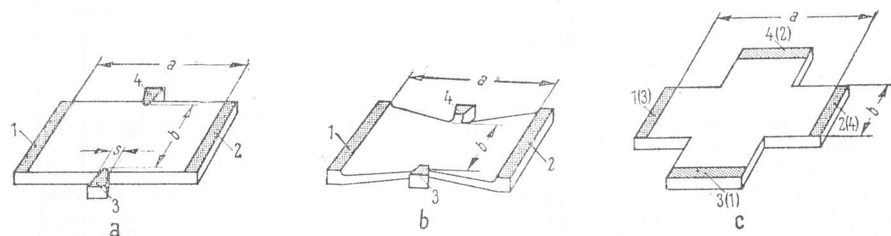


Fig. 2.23. Forme de elemente Hall:

a — forma drptunghiulară; $R_{sl}/R_{20} \approx 3$; tensiunea Hall mare; *b* — forma de fluture: sensibilitate ridicată la flux $K\Phi_0$ dacă fluxul e concentrat pe suprafaţa centrală b.a/2; *c* — formă de cruce simetrică: electrozii de comandă şi electrozii Hall interschimbabili; sensibilitate ridicată la inducţie; $b = s$; $R_{sl}/R_{20} > 10$. *1, 2* — electrozi de comandă; *3, 4* — electrozi Hall; *a* — lungimea în direcţia curentului de comandă; *b* — lăţimea efectivă a elementului Hall; *s* — lăţimea electrodului Hall.

Pentru o sondă Hall dată, expresia constantă $R_H G_H/d$ se poate nota cu K_{B0} (B) care se va numi „sensibilitatea în gol al fluxul magnetic". (v. „Sensibilitatea în gol").

Sensibilitatea în gol relativă la o anumită valoare a inducţiei magnetice se notează cu K_{B0B}, astfel că ecuaţia se poate scrie sub forma

$$U_{20} = K_{B0B} i_1 B,$$

iar folosind celelalte sensibilităţi enumerate în tabelul 2.31 rezultă:

$$U_{20} = K_{\Phi 0B} i_1 \Phi;$$

$$U_{20} = K_{\theta 0B} i_1 i_3 w;$$

$$U_{20} = K_{F0B} B.$$

Tensiunea Hall U_2 a sondei Hall în sarcină:

$$U_1 = R_{10B} i_1 + K_{B0B} i_2 B;$$

$$U_2 = K_{B0B} i_1 B - R_{20B} i_2,$$

unde: U_1 este tensiunea la bornele curentului de comandă;
U_2 — tensiunea Hall la bornele Hall;
R_{10B} şi R_{20B} sînt rezistenţa în gol la curentul de comandă, respectiv la bornele Hall, corespunzătoare inducţiei B;
K_{B0B} este sensibilitatea magnetică în gol corespunzătoare inducţiei respective B;
i_1 — curentul de comandă;
i_2 — curentul de sarcină.

Dacă $U_2 = R_s i_2$, unde R_s este rezistenţa de sarcină, rezultă din aceste ecuaţii că tensiunea Hall a sondei Hall în sarcină este

$$U_2 = \frac{K_{B0B} i_1 B}{1 + \frac{R_{20B}}{R_s}} = \frac{U_{20}}{1 + \frac{R_{20B}}{R_s}}.$$

În ceea ce priveşte influenţa temperaturii, a se vedea „Răspunsul la temperatură".

Liniarizarea

Există o rezistenţă de sarcină R_s şi numai una singură pentru fiecare domeniu al cîmpului de măsurat la care abaterea faţă de o dreaptă a curbei tensiunii Hall în funcţie de acest cîmp este minimă. Această rezistenţă se notează cu R_{sl} (rezistenţa de sarcină de liniarizare). Cu cît domeniul cîmpului de măsurat este mai mare, cu atît este mai ridicată valoarea lui R_{sl}.

Liniaritatea

Dependenţa tensiunii Hall de curentul de comandă şi de mărimea magnetică de măsurat.

La un cîmp magnetic tensiunea Hall este riguros proporţională cu curentul de comandă i_1, atît în gol cît şi în plină sarcină.

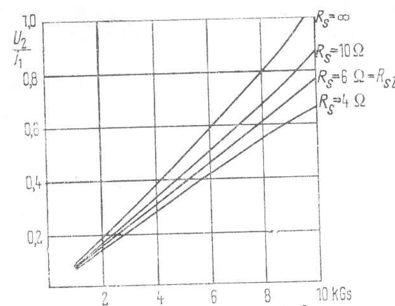


Fig. 2.24. Tensiunea Hall standardizată în funcţie de inducţia de măsurat, cu diferite rezistenţe de sarcină ca parametri.

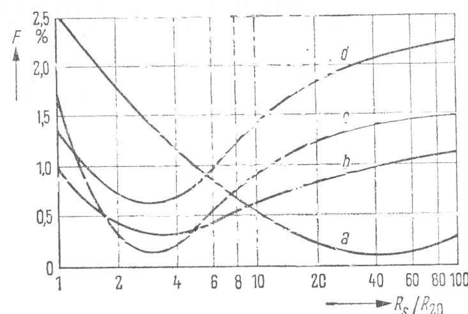


Fig. 2.25. Eroarea de liniaritate E în funcţie de raportul de adaptare R_s/R_{20} pentru diferite elemente Hall, pentru $B = 10$ kGs:

a — InAs, formă de cruce; b — InAs, formă de fluture; c — InAsP, dreptunghiular; d — InAs, dreptunghiular.

Relaţia dintre tensiunea Hall şi cîmpul magnetic nu este reprezentată printr-o linie dreaptă perfectă nici în gol şi nici în sarcină (fig. 2.26). Abaterea curbei în gol în regiunea inducţiilor mici se datoreşte lungimii finite a elementului Hall, iar abaterea de sens contrar a sondei Hall în sarcină în regiunea inducţiilor mari se datoreşte influenţei cîmpului magnetic asupra lui R_2 (fig. 2.24).

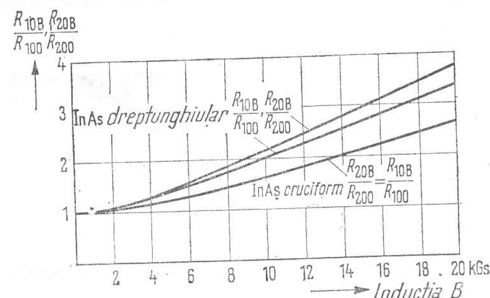


Fig. 2.26. Rezistenţa în gol în funcţie de inducţie pentru elementul Hall în formă de cruce şi dreptunghiular din InAs, cu $R_H = 100$ cm³/As, $a/b = 2$.

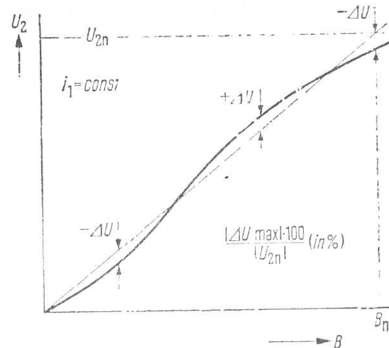


Fig. 2.27. Definirea erorii de liniaritate.

Eroarea de liniaritate E

Cîtul dintre abaterea maximă a curbei $U-B$ reale de la cea ideală şi tensiunea corespunzătoare limitei superioare a domeniului cîmpului de măsurat, în procente (fig. 2.27);

$$E = \frac{\Delta U_{max} \cdot 100}{U_{2n}}.$$

Eroarea de liniaritate E depinde de forma geometrică a elementului Hall, de mobilitatea electronilor μ_n a materialului semiconductor, de domeniul cîmpului de măsurat şi de rezistenţa de sarcină R_s (fig. 2.25).

Materiale pentru elemente Hall

Combinaţiile semiconductoare III—V InSb, $InAs_{0,8}P_{0,2}$ cu mobilitate μ_n ridicată a electronilor sînt deosebit de adecvate pentru valorificarea tehnică a efectului Hall (tensiunea Hall în gol U_{20} ridicată, randament Hall η ridicat şi stabilitate mare a punctului de zero), deoarece (tabelul 2.30)

$$U_{20\,max} \sim \sqrt{R_H \mu_n} \text{ şi } \eta \sim (\mu_n B)^2.$$

În ipoteza că există numai conducţie electronică pură (conducţie de tip n), există următoarea relaţie între constanta Hall şi mobilitatea electronilor:

$$\mu_n = \gamma R_H; \quad R_H = \frac{1}{ne}; \quad \gamma = ne\mu_n,$$

unde: R_H este constanta Hall, în cm³/As;
μ_n — mobilitatea electronilor, în cm²/Vs;
e — sarcina elementară, egală cu $1{,}6 \cdot 10^{-19}$, în As;
n — concentraţia purtătorilor, dată în număr de electroni pe cm³;
γ — conductivitatea, în S/cm.

Valori de referinţă pentru mărimile magnetice de măsurat.

Pentru a se putea face evaluări cantitative asupra proporţionalităţii dintre tensiunea Hall şi cîmpul magnetic de măsurat, asupra curentului de comandă nominal şi a tensiunii Hall reziduale remanente, trebuie să se definească întreg domeniul de variaţie al mărimilor magnetice. Limita superioară a acestuia se numeşte valoarea de referinţă, sau valoarea nominală. Sonda Hall nu este periclitată dacă aceste valori de referinţă se depăşesc, cu condiţia ca la inducţii de peste 15 kGs tensiunea de comandă nominală să se reducă în consecinţă (v. „Curentul de comandă").

B_n — valoarea de referinţă a inducţiei magnetice, se aplică sondelor Hall cu carcasă nemagnetică;

Φ_n — valoarea nominală a fluxului magnetic. Se utilizează în cazul sondelor Hall în ferită: valoarea Φ_n se găseşte sub cotul de saturaţie al feritei;

F_m — valoarea nominală a tensiunii magnetomotoare utilizată la modulatoare şi multiplicatoare; la valori ale t. m. m. pînă la $F_m = i_{3n}w$ nu apare saturaţia în circuitul magnetic;

i_{3n} — valoarea nominală a curentului de excitaţie;
w — numărul de spire ale înfăşurării de excitaţie.

Tensiuni reziduale

Tensiunea reziduală inductivă U_{i0}:

T. e. m. produsă de o inducţie variabilă — în suprafaţa A_2 (cunoscută sub numele de „componentă de zero inductivă" şi care se indică în cm²), formată de conexiunile Hall şi calea de curent din elementul Hall, este

$$U_{i0} = A_2 \frac{dB}{dt}.$$

Sondele Hall pentru măsurarea cîmpului și pentru multiplicare sînt de obicei astfel bobinate, încît să se reducă inducția (fig. 2.28, *b*), spre deosebire de tipul de sondă cu elemente Hall obținute prin depunere și de sondele Hall cu ferită pentru emiterea semnalelor (fig. 2.28, *a*). Posibilitatea de compensare este ilustrată în fig. 2.28, *c*.

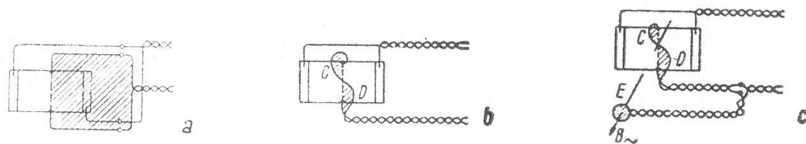


Fig. 2.28. Tensiunea reziduală inductivă și compensarea ei:
a — componenta de zero inductivă A_2, proporțională cu aria hașurată; *b* — sondă Hall cu inducție redusă prin modul de înfășurare a bobinelor. Componenta de zero inductivă A_2 = aria *D* — aria *C*; *c* — compensarea tensiunii reziduale inductive. În cîmpul magnetic se prevede o a doua buclă *E* în serie cu circuitul Hall astfel încît tensiunea indusă în această buclă și în sonda Hall să se anuleze reciproc. Echilibrat la $i_1 = 0$.

T e n s i u n e a H a l l r e z i d u a l ă r e m a n e n t ă U_{rem}:

Este o tensiunea reziduală Hall în gol care apare numai la sondele Hall în ferită și deci într-un circuit magnetic; această tensiunea reziduală rămîne la un curent de comandă dat, după aplicarea unui anumit cîmp magnetic de comandă, ca rezultat al remanenței materialului feromagnetic.

Dacă U_0' reprezintă tensiunea Hall reziduală în gol la curentul de comandă nominal i_{1n} și $\Phi = 0$ după aplicarea lui $+\Phi_n$, iar U_0'' reprezintă tensiunea Hall reziduală la i_{1n} și $\Phi = 0$ după aplicarea lui $-\Phi_n$, avem

$$U_{rem} = \pm \frac{1}{2}(U_0' - U_0'').$$

T e n s i u n e a r e z i d u a l ă r e z i s t i v ă U_{2r0}

Este tensiunea reziduală în gol produsă de curentul de comandă i_1 la inducția $B = 0$, datorită faptului că electrozii Hall nu sînt dispuși în același plan echipotențial

$$U_{2r0} = R_0 i_1.$$

Factorul de proporționalitate R_0, exprimat în V/A, se numește *componenta de zero rezistivă*. R_0 poate fi influențat de temperatură și de cîmpul magnetic.

Stabilitatea acestei componente de zero este o caracteristică importantă a sondelor Hall.

Separarea tensiunii reziduale rezistive U_{2r0} de cea reziduală termică U_{2T} pentru scopuri de măsurare, la curentul de comandă nominal i_{1n}, se face astfel:

Dacă U_2' este tensiunea reziduală în gol măsurată la i_{1n} într-un spațiu care nu este influențat de cîmp (după ce în prealabil s-a demagnetizat sonda Hall cu ferită), iar U_2'' este tensiunea la $-i_{1n}$, atunci

$$U_{2r0} = \frac{1}{2}(U_2' - U_2''), \quad U_{2T} = \frac{1}{2}(U_1' + U_2'').$$

În ce privește posibilitatea de compensare v. fig. 2.29.

T e n s i u n e a r e z i d u a l ă t e r m i c ă U_{2T}.

Electrozii Hall conectați la bornele de intrare formează două termocupluri ale căror tensiuni se anihilează reciproc dacă electrozii Hall se găsesc la aceeași temperatură. Dacă însă temperaturile sînt diferite, apare o diferență între aceste tensiuni, numită tensiunea reziduală termică U_{2T}.

Condiția de a menține această tensiune la o valoare mică: În cazul funcționării în aer se va evita convecția și radiația unilaterală; în condiții de răcire artificială se va intercala o pastă bună conducătoare de căldură între suprafața de răcire și placa suport a elementului Hall.

Pentru determinarea prin măsurare v. „Tensiunea reziduală rezistivă".

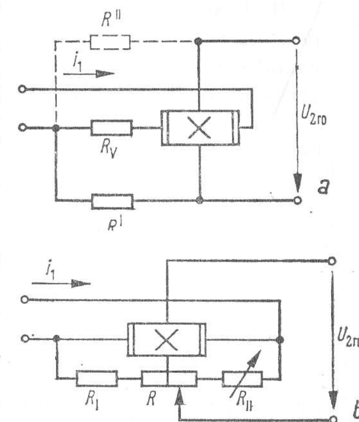


Fig. 2.29. Compensarea tensiunii reziduale rezistive U_{2r0}:
a — compensarea la temperatură constantă conform polarității lui U_{2r0} pentru: R' sau R''; $R', R'' \gg R_v$; *b* — compensare slab influențată de temperatură, pentru $R_I \approx 0{,}8 R_{II}$; $R \ll R_I, R_{II}$.

Rezistențe

R_1 — *rezistența internă a căii curentului de comandă:*

R_{10} — valoarea lui R_1 măsurată cu circuitul Hall deschis;

R_{10B} — valoarea lui R_{10} la inducția corespunzătoare B;

R_{100} — valoarea lui R_{10} la inducția $B = 0$.

R_2 — *rezistența internă corespunzătoare tensiunii Hall:*

R_{20} — valoarea lui R_2 măsurată cu circuitul de comandă deschis;

R_{20B} — valoarea lui R_{20} la inducția corespunzătoare B;

R_{200} — valoarea lui R_{20} la inducția $B = 0$.

Rezistențele interne sînt influențate de temperatură și de cîmpul magnetic (fig. 2.26).

Influența cîmpului magnetic asupra lui R_2 și R_{20} explică dece caracteristicile $U_2 - B$ ale sondei Hall în gol și în sarcină sînt diferite.

Trebuie să se țină seama de creșterea lui R_1 în cîmpul magnetic atunci cînd se măsoară inducții mari pentru determinarea curentului de comandă (v. „Curentul de comandă nominal") chiar atunci cînd sursa de alimentare are o tensiune de comandă constantă.

Cîmpul autoindus al sondei Hall

Este cîmpul magnetic produs în elementul Hall de către circuitul curentului de comandă; în cazul curentului alternativ, el produce o tensiune perturbatoare de frecvență dublă.

Sensibilitatea în gol $K_{B0}(B)$

Este o mărime constantă pentru fiecare sondă Hall (v. și „Tensiunea Hall") referitoare la mărimea magnetică de măsurat, și anume

$$K_{B0}(B) = \frac{1}{d} R_H G_H,$$

unde: R_H este coeficientul Hall;

G_H — o funcţie geometrică care depinde de dimensiunile laturilor şi electrozilor a/b, s/a (v. fig. 2.23) şi de inducţia B însăşi;

d — grosimea elementului Hall.

Unităţile practice pentru mărimile magnetice de măsurat:

Inducţia magnetică B .... kGs;

Fluxul magnetic Φ .... Mx;

Tensiunea magnetomotoare în circuit magnetic închis

$F_m = i_3 w$ .... A.

Definiţiile şi simbolurile sensibilităţilor relative la aceste mărimi sînt date în tabelul 2.31.

Sensibilităţile în gol depind de temperatură şi de mărimea magnetică de măsurat: drept consecinţă ele pot fi specificate numai pentru valori de referinţă particulare (v. „Valori de referinţă pentru mărimile magnetice de măsurat").

Tabelul 2.31. **Sensibilitatea în gol**

Denumirea [1]	Dimensiuni	Ecuaţia de definiţie	Dependenţă	Utilizare
Sensibilitatea de inducţie în gol $K_{B0}(B) = K_{B0B}$	$\frac{V}{A\ kGs}$	$\frac{u_{20}}{i_1 B}$	$\sim R_H$, $\sim \frac{1}{d}$ depinde puţin de ab	Generatoare Hall cu carcase nemagnetice
Sensibilitatea de flux în gol $K_{\Phi 0}(B) = K_{\Phi 0B}$	$\frac{V}{AMx}$	$\frac{u_{20}}{i_1 \Phi}$	$\sim R_H$ $\sim \frac{1}{d}$, $\sim \frac{1}{ab}$	Generatoare Hall cu ferită
Sensibilitatea de t.m.m în gol $K_{\Theta 0}(B) = K_{\Theta 0B}$	$\frac{V}{A^2}$	$\frac{u_{20}}{i_1 i_3 \omega}$	$\sim R_H$, $\sim \frac{1}{\delta}$	Generator Hall în circuit magnetic închis
Sensibilitatea de cîmp în gol $K_{F0}(B) = K_{F0B}$	$\frac{V}{kGs}$	$K_{BoB} i_{1n}$	$\sim R_H$, $\sim \frac{1}{d}$, $\sim ab$	Compararea generatoarelor Hall cu carcasă nemagnetică în privinţa tensiunii Hall maxime care se poate atinge în gol

[1]) Forma simplificată a formulei sensibilităţii referitoare la o anumită mărime magnetică de măsurat

Pentru sensibilităţile mijlocii în gol ale sondelor Hall produse în serie de către firma Siemens, v. tabelul 2.32.

Tabelul 2.32. **Sensibilitatea medie în gol a generatoarelor Hall produse în serie de firma Siemens**

A Element Hall din material tras, polizat la grosime
B Element Hall din material tras, decapat la grosime
C Element Hall format prin depunerea prin evaporare a semiconductorului pe o placă suport

Sensibilitatea	Unitatea	Materialul semiconductor					
		InAs		InAsP	InSb		
		A	*C*	*A*	*A*	*B*	*C*
K_{B0} la 10 kGs	$\frac{V}{A\ kGs}$	0,1	0,6	0,15	—	5	5
$K_{\Phi 0}$ la 10 Mx	$\frac{V}{A\ Mx}$	10^{-3}	—	—	$2 \cdot 10^{-3}$	0,2	—
$K_{\Theta 0}$ la 20 A	$\frac{V}{A^2}$	0,07	—	—	—	—	—
K_{F0} la 10 kGs (fără răcire specială; în aer)	$\frac{V}{kGs}$	0,04	0,07	0,03	—	0,15	0,1

Temperatura la suprafaţă

Dacă nu se specifică altfel (de exemplu în cazul sondelor cu peliculă depusă, destinate temperaturilor înalte şi joase), sonda Hall poate funcţiona la temperaturi cuprinse între −50°C şi +120°C.

Pentru a ne asigura că limita de 120°C nu este depăşită, se va respecta următoarea relaţie privitoare la temperatura maximă admisibilă la suprafaţă

$$T_{s\,max} = 120°C - \Delta T_{max}$$

(pentru ΔT_{max} v. „Curentul de comandă").

Răspunsul la temperatură

La variaţia temperaturii ambiante de la T_0 la $T_0 + \Delta T$ este valabilă următoarea relaţie pentru tensiunea Hall în gol

$$U_{20}(T_0 + \Delta T) = U_{20}(T_0)\,(1 + \beta\,\Delta T).$$

În cazul unei sonde Hall în sarcină, tensiunea Hall este

$$U_2\,(T_0 + \Delta T) = \frac{U_{20}(T_0)\,(1 + \beta \Delta T)}{1 + \dfrac{R_{20B}\,(T_0)(1 + \alpha \Delta T)}{R_s}}$$

unde: α este coeficientul de temperatură mediu al rezistenţelor R_{100} şi R_{200}, în % grd;

β — coeficientul de temperatură mediu al tensiunii Hall în gol U_{20}, în % grd.

Coeficienții de temperatură depind de temperatura de referință T_0 și de intervalul ΔT în care ei se definesc, astfel:

$$\alpha = \frac{100}{R(T_0)} \frac{\Delta R}{\Delta T}\,; \quad \beta = \frac{100}{U_{20}(T_0)} \frac{\Delta U_{20}}{\Delta T}.$$

Pentru valorile lui α și β v. tabelul 2.30.

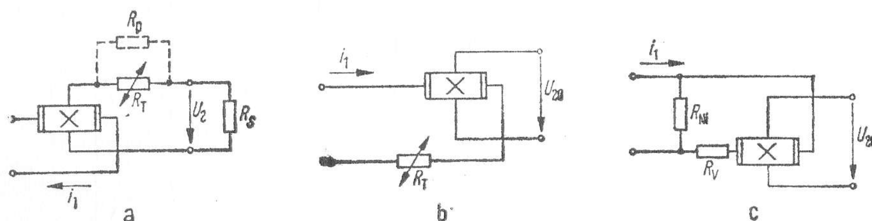


Fig. 2.30. Compensarea la temperatură a tensiunii Hall:

Posibilă numai pentru o rezistență de sarcină dată $R \leqslant 10R_{200}$; slab influențată de cîmpul magnetic.

La intervale de temperatură mici se aplică următoarea formulă pentru rezistența conductorului termoelectric avînd coeficientul de temperatură λ.

$$R_T(T_0) \approx \frac{R_{200}(T_0)(\alpha - \beta) - \beta R_s}{\beta - \lambda}$$

unde α și β se iau din tabelul 2.30;

Tensiunea de comandă constantă aplicată sondei Hall. În cazul elementelor Hall din InSn se obține o îmbunătățire în ce privește influența temperaturii și fără conductor termoelectric, dat fiind că coeficientul de temperatură al lui R_{100} este negativ.

Puternic influențată de cîmpul magnetic. Rezistența de nichel în paralel cu calea de curent. Cu cît R_v este mai mare, cu atît compensarea este mai puțin dependentă de cîmpul magnetic. Pentru $R_v = 8R_{100}$ se poate obține o precizie de $0{,}5^0/_{00}$ /10 grd.

$$R_{Ni}(T_0) \approx (R_{100} + R_v)\left(\frac{\alpha Ni}{\beta'} - 1\right)$$

$$\beta' = \frac{U_2(T_0) - U_2(T_0 + \Delta T)}{U_2(T_0)\Delta T}.$$

În gol $\beta' = \beta$; α și β conform tabelului 2.30.

În fig. 2.30 sînt reprezentate cele trei posibilități pentru compensarea temperaturi tensiunii Hall.

Trebuie să se aibă în vedere că elementele influențate de temperatură și elementul Hall ating întotdeauna aceeași temperatură.

2.9.3. Dispozitive cu sonde Hall

Emițătoare de semnal fără contacte și fără atingererea obiectivelor supravegheate

Acționate prin magneți (tip KSM)

Sonde Hall cu ferită montate în carcase din mumetal, cu fișă și conexiuni lipite.

În fig. 2.31 *a*, *b* și *c* sînt reprezentate curbele tensiunii Hall în cazul emițătoarelor de semnal cu elementele Hall așezate perpendicular pe direcția de mișcare, pentru diferite dispoziții ale magneților; în fig. 2.31, *d* este reprezentat emițătorul de semnal cu memorie, iar în fig. 2.31, *e* — cel destinat unor distanțe mici între polii magnetului ($\geqslant$ 0,7 mm).

Dacă elementul Hall este paralel cu direcția de mișcare, curba tensiunii Hall are forma din fig. 2.31, *f* și *g*.

Acționate de piese feromagnetice (tip KSE)

Punte echilibrată cu magneți permanenți, cum se arată în fig. 2.31, *h*, înglobată într-o carcasă nemagnetică.

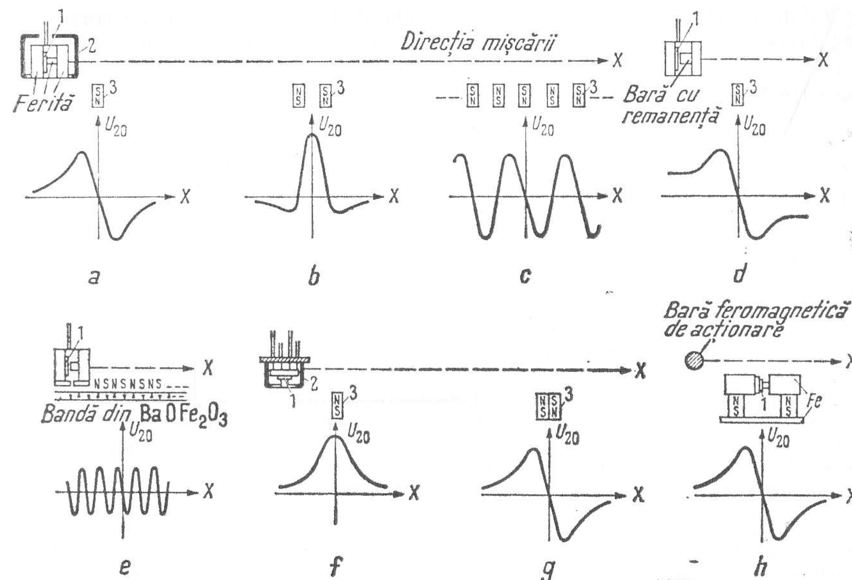


Fig. 2.31. Curbele tensiunii Hall pentru emițătoare de semnal fără contacte:
a...g — pentru acționare prin magneți; *h* — pentru acționare prin piese feromagnetice: *1* — elementul Hall; *2* — ecran din mumetal; *3* — magneți în formă de bară.

Traductor Hall de separare

Construcție specială a unui mutiplicator Hall pentru curenți de excitație $\leqslant$ 3000 A pentru măsurarea puterii în c.c. și pentru determinarea valorilor reale ale curentului continuu fără conductoare de legătură.

Modulatorul Hall

Dispozitiv utilizat pentru modularea tensiunilor sau curenților continui.

Multiplicatorul Hall

Este o sondă Hall montată în întrefierul unui circuit feromagnetic închis și echipat cu o înfășurare de excitație, destinată multiplicării a doi curenți. Dacă cîmpul magnetic din întrefier este mare în comparație cu cel din materialul feromagnetic, se poate scrie următoarea relație pentru inducția din întrefier

$$B_\delta = \mu_0 \cdot i_3 \cdot \frac{w}{\delta},$$

unde: B_δ este inducția în întrefier, în Gs;
μ_0 — permeabilitatea magnetică a vidului (= 1,2566 H/cm · 10^{-8});
i_3 — curentul de excitație, în A;
w — numărul de spire;
δ — lățimea întrefierului, în cm.

Tensiunea Hall este proporțională cu produsul dintre curentul de comandă i_1 și curentul de excitație i_3. În fig. 2.32 este reprezentată curba erorilor datorite histerezisului

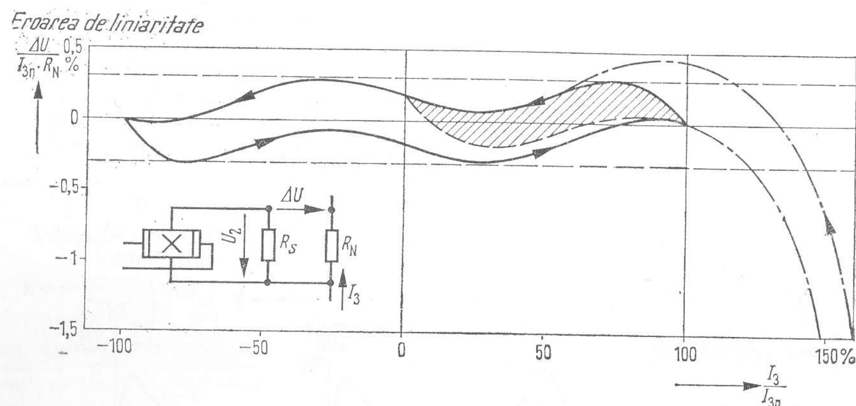


Fig. 2.32. Eroarea de multiplicare a unui multiplicator Hall; $R_N = U_{2n}/i_n$.

circuitului magnetic și neliniarității sondei Hall. Lățimea buclei formată de curba erorilor depinde de materialul circuitului magnetic și de neliniaritatea sondei Hall. Dacă curentul de excitație crește pînă la i_{3n} numai într-o singură direcție, eroarea se înscrie în suprafața hașurată.

Dacă i_{1min} și i_{3min} reprezintă valorile cele mai scăzute care apar în timpul funcționării curenților ce urmează a fi multiplicați, iar i_{1n} și i_{3n} respectiv valorile lor nominale, eroarea de multiplicare atinge un minim,

$$\frac{i_{3n}}{i_{3min}} < \frac{i_{1n}}{i_{1min}}.$$

Pentru influența frecvenței asupra amplitudinii tensiunii Hall și asupra defazajului dintre curentul de excitație și tensiunea Hall v. fig. 2.19 și 2.20.

2.9.4. Sonde magnetorezistive

Sondele magnetorezistive sînt formate de rezistențe semiconductoare din antimoniură de indiu și ele pot fi comandate direct și fără contact prin electromagneți sau magneți permanenți care se deplasează în raport cu sonda magnetorezistivă. Ele se utilizează pentru potențiometre fără contacte, măsurări speciale ale cîmpului magnetic și pentru determinarea fără contact a poziției magneților.

Tipuri

Tipul deschis (fig. 2.33, *a*); elementul magnetorezistiv *1* este fixat pe placa suport *2* și este protejat prin capacul izolant *3*. Placa suport poate fi din oxid de aluminiu (Al_2O_3) sau dintr-o folie, de exemplu de hostaphan. Acest tip de sondă magnetorezistivă se utilizează în principal în întrefierurile înguste pentru măsurarea cîmpurilor magnetice. Tipuri auxiliare sînt sondele duble și cele axiale.

Fig. 2.33. Tipuri de sonde magnetorezistive: *a* — tipul deschis; *b* — tipul sandviș.

Tipul sandviș (fig. 2.33, *b*); elementul magnetorezistiv *1* este așezat între o placă suport *2* și un capac *4*. Rezistența termică este redusă datorită dispării bilaterale a căldurii. Există un tip auxiliar la care placa suport și capacul sînt din ferită, dar acesta este adecvat numai pentru inducții mai mici decît 4 kGs.

Simbolizare (pentru sondele magnetorezistive produse de Siemens)

Exemplu:

FP 28 D 50

- 50 — Rezistența la bază R_0, Ω.
- D — Codul literal al semiconductorului utilizat; caracteristicile (conform tabelului 2.33).
- 28 — Codul numeric referitor la tip și la dimensiunile geometrice (numărul de serie al tipodimensiunii)
- FP — Sondă magnetorezistivă (Field Plate)

Capacitatea de încărcare a sondelor magnetorezistive

Temperatura maximă admisibilă a elementului

$$T_R = 95°C.$$

Încălzirea maximă admisibilă a elementului

$$\Delta T_{max} = 30°C.$$

Curentul maxim admisibil

$$i_{max} = \sqrt{\frac{\Delta T_{max}}{R_{B\,max} R_t}}\ ^{1)}$$

Tensiunea maximă admisibilă de aplicat elementului magnetorezistiv

$$U_{max} = \sqrt{\frac{\Delta T_{max} R_{min}}{R_t}}\ ^{1)}$$

1) Pentru temperatură ambiantă sau a suprafeței de răcire $T_a > 65°C$ ΔT_{max} trebuie înlocuit cu $(95 - T_a)$.

unde: $R_{B\ max}$ este rezistenţa maximă a sondei magnetorezistive în timpul funcţionării, în Ω;

R_t — rezistenţa termică, în grd/W (specificată în catalog pentru diferite condiţii de răcire);

R_{min} — rezistenţa minimă a sondei magnetorezistive în timpul funcţionării, Ω.

Răspunsul la frecvenţă

Variaţia rezistenţei urmăreşte fără întîrziere un cîmp magnetic de înaltă frecvenţă.

Rezistenţa de bază R_0

Rezistenţa elementului magnetorezistiv, în Ω, măsurată la 25°C şi la inducţia $B = 0$.

Coeficientul de temperatură T_K

Coefisientul de temperatură al materialului elementului magnetorezistiv depinde de inducţie şi de temperatura însăşi şi se exprimă în %/grd. Valorile lui T_K pentru materialele semiconductoare utilizate la elementele magnetorezistive sînt date în tabelul 2.33 şi fig. 2.40.

Efectul magnetorezistiv

Într-o piesă din material semiconductor de lungime a şi lăţime b (fig. 2.34, a) căile de curent în lipsa cîmpului magnetic reprezintă distanţa cea mai scurtă dintre electrozii conductori. Dacă materialul este supus unui cîmp magnetic perpendicular, căile

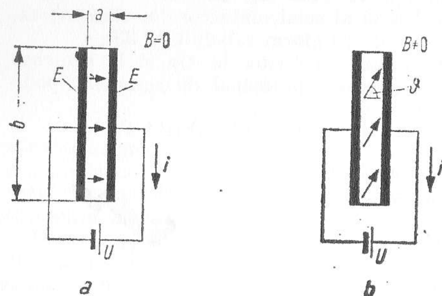


Fig. 2.34. Direcţia căilor de curent (→) într-o placă semiconductoare de dimensiuni $a \cdot b$ cu electrozi metalici:
a — în absenţa cîmpului magnetic; b — într-un cîmp magnetic perpendicular pe planul figurii (ϑ — unghiul Hall).

de curent sînt deviate cu un unghi Hall ϑ (fig. 2.34, b) şi devin astfel mai lungi. Creşterea rezistenţei datorită lungimii căii de curent depinde de:

— mobilitatea purtătorilor de sarcină ai materialului elementului, în cm²/Vs;
— valoarea inducţiei, în Vs/cm²;
— raportul b/a dintre lăţime şi grosime

Elementele magnetorezistive

În mod teoretic acestea sînt constituite dintr-un număr mare de plăci semiconductoare (fig. 2.35, a) legate în serie, fiecare dintre ele avînd raportul dintre lăţime şi grosime $b/a \geq 6$.

Există următoarele execuţii practice de elemente magnetorezistive:

— Placă semiconductoare din antimoniură de indiu (InSb) cu o reţea de indin la suprafaţă (fig. 2.35, b).

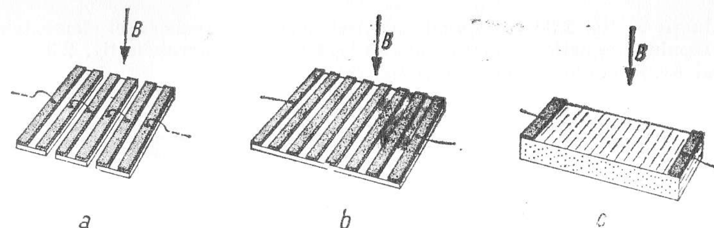


Fig. 2.35. Structura elementelor magnetorezistive.

— Fîşii semiconductoare de antimoniură de indiu care conţine ace din antimoniură de nichel (fig. 2.35, c), a căror conductivitate este de 200 ... 300 ori mai mare decît cea de InSb. Aele au dimensiunile ≈ 1 μm · 50 μm. Elementele simbolizate cu literele D, L şi N conform tabelului 2.33.

Tabelul 2.33. **Variaţia relativă a rezistenţei şi a coeficientului de temperatură pentru diferite materiale semiconductoare**

Materialul semiconductor	γ S' cm	Variaţia relativă a rezistenţei la 25° şi B = ± 3 kGs	± 10 kGs	Coeficientul de temperatură T_k la 25°C şi B = 0	± 3 kGs	± 10 kGs
D	200	3,2	17	− 1,7	− 2,7	− 2,7
L	550	1,8	8	− 0,2	− 0,4	− 0,55
P	800	2,1	10	0	− 0,125	− 0,18
N	800	1,7	7,5	0	− 0,125	− 0,18
R	1000	1,8	8	+ 0,05	− 0,1	− 0,13
T	1300	1,7	6,5	+ 0,1	− 0,025	− 0,08

— Fîşii semiconductoare din antimoniură de indiu care conţin ace din antimoniură de nichel cu acoperire (reţea) suplimentară de indiu. Elementele simbolizate cu literele P, R şi T conform tabelului 2.33.

Dispunerea geometrică a plăcilor semiconductoare şi orientarea acelor de NiSb sînt conforme cu destinaţia elementului magnetorezistiv (fig. 2.36). Direcţiile indicate

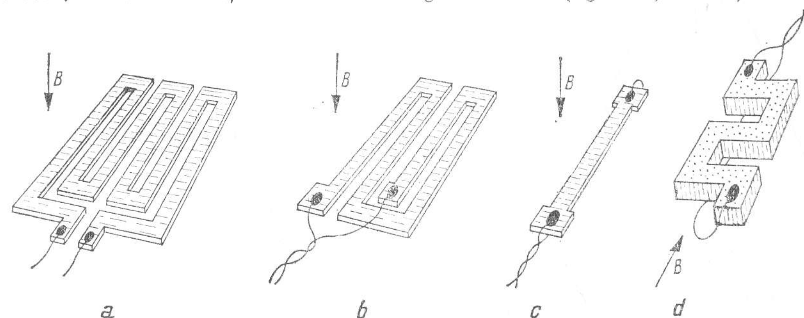


Fig. 2.36. Forme de elemente magnetorezistive:
a — forma de labirint; rezistenţa de bază, în funcţie de arie, ajunge la cîtiva kΩ; b — formă de labirint pentru inducţii mici; c — forma de bară, adecvată cîmpurilor magnetice alternative; d — formă destinată sondelor axiale.

pentru inducţie în fig. 2.36 corespund variaţiei maxime a rezistenţei elementelor. Dacă direcţia cîmpului magnetic deviază cu unghiul φ faţă de cea normală (fig. 2.37) rezistenţa elementului scade conform curbei din fig. 2.38.

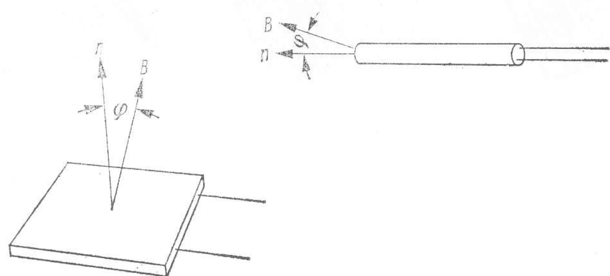


Fig. 2.37. Direcţia *n* a cîmpului magnetic corespunzător sensibilităţii maxime.

Raportul rezistenţelor R_B/R_0

Este raportul dintre rezistenţa R_B a unei sonde megnetorezistive în cîmpul magnetic şi rezistenţa de bază a acesteia R_0 în absenţa cîmpului magnetic.

Acest raport depinde de inducţie pînă la 3 kGs, iar peste această valoare, el variază liniar cu inducţia. În fig. 2.39 este reprezentată variaţia lui R_B/R_0 la 25°C pentru diferite materiale pentru elemente magnetorezistive.

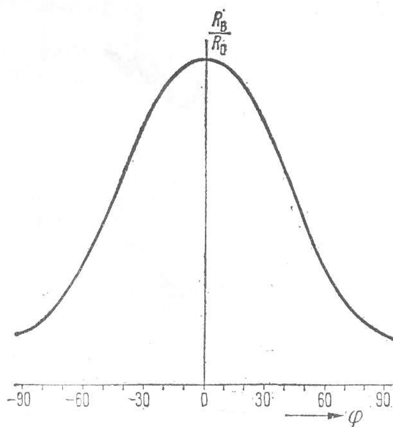


Fig. 2.38. Dependenţa fundamentală a raportului rezistenţelor R_B/R_0 de direcţia cîmpului magnetic.

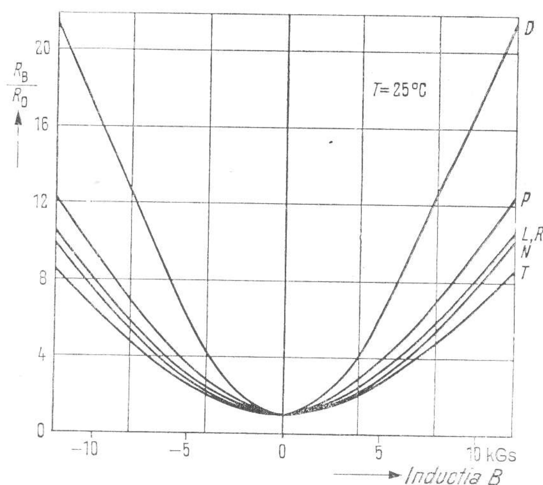


Fig. 2.39. Raportul rezistenţelor R_B/R_0 în funcţie de inducţia *B* pentru materialele semiconductoare D, L, N, P, R şi T.

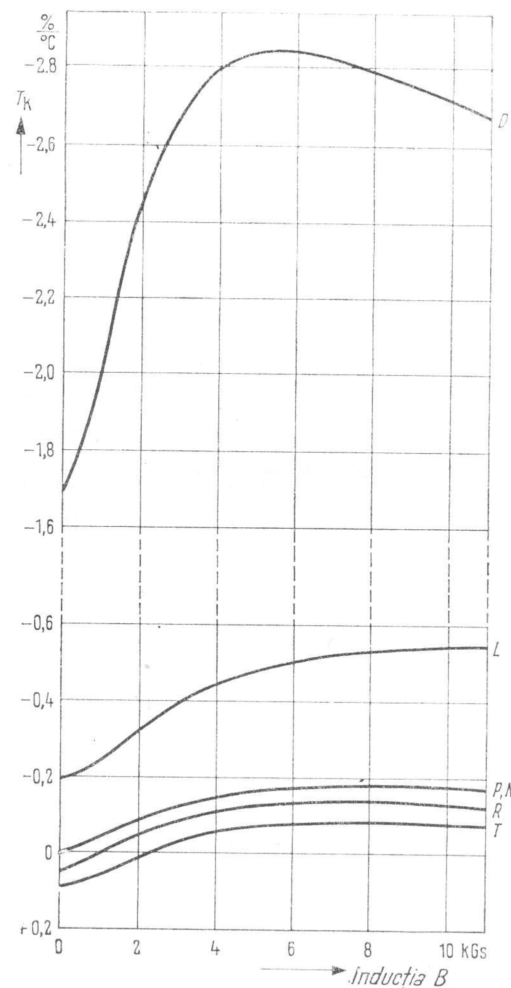


Fig. 2.40. Coeficientul de temperatură T_K în funcţie de inducţie pentru materialele semiconductoare D, L, N, P, R şi T la o temperatură de 25°C.

2.10. ACUSTICĂ

2.10.1. Definiţii principale[1])

Amplitudine: (a unei mărimi sinusoidale simple):
Valoarea maximă (valoarea de vîrf).

* *Armonică:*
Variaţia sinusoidală a cărei frecvenţă este un multiplu întreg al frecvenţei fundamentale.

Bel:
Unitatea adimensională utilizată pentru compararea valorilor puterilor. Numărul de beli care exprimă valorile relative a două puteri este logaritmul zecimal al raportului puterilor.

Ciclu: (al unei mărimi periodice):
Repetarea completă a seriei de variaţii care au loc în timpul perioadei unei mărimi variabile care se repetă.

Decibel:
A zecea parte dintr-un bel. Prescurtare: dB.

* *Frecvenţă:*
Numărul de perioade în unitatea de timp. Unitatea: Hz.

Frecvenţă fundamentală:
Frecvenţa componentei fundamentale a unei mărimi periodice nesinusoidale.

* *Impedanţă acustică specifică:*
Raportul complex dintre presiunea acustică eficace într-un punct şi viteza de deplasare eficace a particulei în acel punct.

* *Intensitate acustică:*
Fluxul de energie acustică care străbate unitatea de arie perpendiculară pe direcţia de propagare.

Mărime periodică:
O mărime oscilatorie ale cărei valori se repetă la anumite intervale de timp egale.

Nivel (al unei mărimi legate de putere):
Raportul, exprimat în decibeli, dintre valoarea mărimii respective şi o valoare de referinţă standardizată.

Perioadă:
Creşterea minimă a variabilei pentru care mărimea periodică dependentă de această variabilă ia valori egale.

* *Presiunea acustică instantanee:*
Presiunea totală într-un punct al unui mediu la un moment dat, minus presiunea statică în acel punct.

[1]) Pentru mărimile notate cu * definiţiile sînt reproduse după STAS 1957-66 „Acustica. Terminologie, simboluri şi unităţi de măsură", iar restul definiţiilor sînt extrase din British Standard 561 (1955) „Glosar de termeni acustici".

* *Presiune de radiaţie:*
Presiunea exercitată într-un punct dat al unui obstacol, de o vibraţie acustică ce se propagă într-un mediu elastic.

* *Son:*
Unitatea de tărie a unui sunet avînd o frecvenţă de 1000 Hz.

* *Spectru acustic:*
Reprezentarea în funcţie de frecvenţă a amplitudinii (şi uneori a fazei) componentelor unui sunet complex sau unui zgomot.

* *Spectru continuu:*
Spectrul acustic al unui sunet complex sau al unui zgomot ale cărui componente sînt distribuite în mod continuu într-o porţiune sau în totalitatea spectrului.

* *Spectru de linii:*
Spectru acustic ale cărui componente au o frecvenţă determinată (discret) şi care se poate reprezenta prin linii.

* *Sunet:*
Vibraţie acustică capabilă să producă o senzaţie auditivă.

* *Sunet pur:*
Sunet datorit unei vibraţii sinusoidale.

Tărie:
Caracterul senzaţiei auditive, legat de presiunea acustică a unui sunet, care permite ordonarea sunetelor pe o scară, de la „slabe" la „puternice".

Valoarea medie pătratică (valoare eficace sau efectivă a unei mărimi variabile):
Rădăcina pătrată a valorii medii a pătratelor valorilor instantanee ale mărimii. În cazul unei vibraţii periodice, media se ia pe o perioadă.

* *Viteza de deplasare instantanee:*
Valoarea componentei alternative a vitezei unei particule la un moment dat, particula făcînd parte dintr-un mediu în vibraţie în acel moment.

* *Zgomot:*
Vibraţia acustică care nu are componente bine definite. Sunet supărător.

Bibliografie

1. Recomandarea R226 a ISO (Decembrie 1961). Contururile normale de egală tărie pentru sunete pure şi pragul normal de audibilitate în condiţii de ascultare în cîmp liber.

2. Recomandarea R357 a ISO (Decembrie 1963). Exprimarea nivelelor de putere şi de intensitate ale sunetului sau zgomotului.

3. Recomandarea R495 a ISO (August 1966). Cerinţele generale pentru pregătirea prescripţiilor de încercare pentru măsurarea zgomotului emis de maşini.

4. Recomandarea R532 a ISO (Decembrie 1966). Metodă de calcul a nivelului de tărie.

5. Publicaţia Nr. 179 (1965) a Comisiei Electrotehnice Internaţionale: Aparate de precizie pentru măsurarea nivelului acustic.

2.10.2. Mărimi și formule de importanță practică în acustică

Tabelul 2.34. **Simboluri și unități utilizate în acustică**

Simbol	Mărimea	Unități	
		CGS[1])	MKS
a	Amplitudine acustică	cm	m
c	Viteza sunetului	cm s^{-1}	m s^{-1}
E	Modulul lui Yonug	$cm^{-1}g\ s^{-2}$ = dyn cm^{-2}	$m^{-1}kg\ s^{-2}$ = N m^{-2}
F	Forță	cm g s^{-2} = dyn	m kg s^{-2} = N(Newton)
f	Frecvență	s^{-1} = Hz	s^{-1} = Hz
G	Modulul de tăiere	$cm^{-1}g\ s^{-2}$ = dyn cm^{-2}	m^{-1} kg s^{-2} = Nm^{-2}
I	Intensitatea acustică	g s^{-3} = erg $cm^{-2}s^{-1}$	kg s^{-3} = J $m^{-2}s^{-1}$ = W m^{-2}
J	Moment de inerție polar	cm^4	m^4
K	Compresibilitatea adiabatică	cm $g^{-1}s^2$ = dyn^{-1} cm^2	$N^{-1}m^2$ = m $kg^{-1}s^2$
r	Factor de reflexie acustică	—	—
L	Nivel de presiune acustică	(dB)	(dB)
m	Masă	g	kg
m_s	Masa mediului oscilant	g	kg
N	Tărie	(son)	(son)
P	Putere acustică	cm^2gs^{-3} = erg s^{-1}	$m^2kg\ s^{-3}$ W
P_s	Putere disipată	g cm^2 s^{-3} = erg s^{-1}	$m^2kg\ s^{-3}$ W
p	Presiune acustică	$cm^{-1}g\ s^{-2}$ = dyn · cm^{-2} = μbar	$m^{-1}kg\ s^{-2}$ = N m^{-2}
p_0	Presiunea gazului la echilibru	cm^{-1} g s^{-2} = dyn · cm^{-2} = μbar	m^{-1} kg s^{-2} = N m^{-2}
q	Arie (secțiune transversală)	cm^2	m^2
r_s	Rezistența la radiație acustică	g s^{-1} = dyn s cm^{-1}	kg s^{-1} = N m^{-1} s
S	Arie (suprafață)	cm^2	m^2
T	Intervalul de timp	s	s
T_1	Timp de reverberație	s	s
t	Timp	s	s
V	Volum	cm^3	m^3
v	Viteză de deplasare instantanee	cm s^{-1}	m s^{-1}
W	Energie	$cm^2g\ s^{-2}$ = erg	$m^2kg\ s^{-2}$ = N m (Joule)
Z_s	Impedanța acustică specifică	$cm^2g\ s^{-1}$ = μbar s cm^{-1} (Rayl)	m^{-2} kg s^{-1} = N m^{-3} s (1 Rayl = 10 Ns m^{-3})
Z_r	Impedanța de radiație acustică	g s^{-1} = dyn s cm^{-1}	kg s^{-1} = N m^{-1} s
$x, y, z, (r)$	Coordonate de poziție	cm	m
Z_a	Impedanța acustică	cm^{-4} g s^{-1} = μbar cm^{-3} s (Ohm acustic)	m^{-4} kg s^{-1} = N m^{-5} s
α	Coeficient de absorbție acustică	—	—
ΔL	Diferența de presiune acustică	(dB)	(dB)
Λ	Nivel de tărie	(phon)	(phon)
ζ	Coeficientul de reflexie acustică	—	—
λ	Lungime de undă	cm	m
ν	Raportul lui Poisson	—	—
ρ	Densitate	cm^{-3} g	m^{-3} kg
τ	Coeficient de transmisie acustică	—	—
ω	Pulsație	s^{-1}	s^{-1}

[1]) Sistemul CGS este încă larg utilizat în acustica fizică, pe cînd sistemul MKS se preferă în prezent în acustica industrială (v. 1.3 „Factori de conversiune“, p. 19).

Simbol	Mărimea	Sistemul MKSA	Unități combinate
B	Factor de transmisie electroacustic:		
B_E	pentru receptor	V/μbar	Vm^2/N
B_S	pentru emițător	μbar/V	N/Vm^2
η	Randament		
A	Absorbția acustică	m^2	

1. Viteza propagării sunetului[1])

a) în gaze	$c = \sqrt{\frac{1}{K\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}}$; $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ γ este raportul căldurilor specifice
b) în lichide	$c = \sqrt{\frac{1}{K\rho}}$
c) în corpuri elastice solide infinite	
unde longitudinile	$_{long} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2r^2)}}$
unde transversale	$c_{trans} = \sqrt{\frac{E}{2\rho\,(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$
d) în bare	
unde longitudinale	$c_{bare\ long} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
unde de flexiune	$c_{bare\ flex} = \frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{EJ}{\rho q}}$
bară dreptunghiulară avînd secțiunea de lățime b și grosime d; vibrația paralelă cu b	$c_{\square\ flex} = \frac{\pi d}{\lambda}\sqrt{\frac{E}{3\rho}}$
bară cu secțiune rotundă de rază r	$c_{\bigcirc\ flex} = \frac{\pi r}{\lambda}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$
e) în corzi întinse, unde transversale	$c_{coardă} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$ σ este tensiunea din coardă pe unitatea de arie

[1]) Pentru simboluri și unități v. tabelul 2.34.

2. **Presiunea acustică:** $p = vW_0$; $p_{ef} = \frac{p}{\sqrt{2}}$ pentru unde sinusoidale.

Viteza de deplasare instantanee	$v = \frac{p}{W_0}$; $v_{ef} = \frac{v}{\sqrt{2}}$ pentru unde sinusoidale
impedanța acustică specifică	$W_0 = \rho c \cos \varphi$
pentru unde plane	$\varphi = 0$ și $\cos \varphi = 1$
pentru unde sferice	$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\lambda}{2\pi r}$ r este distanța dintre obiect și sursă
amplitudinea acustică	$a = \frac{v}{\omega} = \frac{p}{\omega W_0}$

3. **Puterea acustică:** $P = \oint I \mathrm{d}S$.

Intensitatea acustică	$I = \frac{pv}{2} \cos \varphi = p_{ef} v_{ef} \cos \varphi =$ $= \frac{1}{2} v^2 W_0 \cos \varphi = v_{ef}^2 W_0 \cos \varphi =$ $= \frac{1}{2} v^2 \rho c \cos^2 \varphi = v_{ef}^2 \rho c \cos^2 \varphi =$ $= \frac{1}{2} \frac{p^2}{W_0} \cos \varphi = \frac{p^2}{2\rho c} = \frac{p_{ef}^2}{\rho c}$

4. **Rezistența de radiație acustică** R_r **și masa mediului oscilant** m_s.

a) pentru o sursă de radiație sferică de ordinul zero (sferă vibrantă cu raza R_0)	$R_r = \frac{4\pi R_0^2 c\rho}{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi R_0}\right)^2}$ $m_s = 4\pi R_0^3 \rho \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi R_0}{\lambda}\right)^2}$
caz particular ($\lambda \gg 2\pi R_0$)	$R_r = \frac{4\pi R_0^4 \rho \omega^2}{c}$ $m_s = 4\pi R_0^3 \rho$
caz particular ($\lambda \ll 2\pi R_0$)	$T_r = 4\pi R_0^2 \rho c$ $m_s = 0$

b) diafragmă cu piston (de rază R_0) într-un perete rigid infinit, radiație unidirecțională)	$R_r = \rho c \pi R_0^2 h(y)$ $m_s = \frac{8}{3} \rho R_0^3 g(y)$
caz particular ($\lambda \gg 2\pi R_0$)	$R_r = \frac{\rho \pi R_0^4 \omega^2}{c}$ $m_s = \frac{8}{3} \rho R_0^3$
caz particular ($\lambda \gg 2\pi R_0$)	$R_r = \pi R_0^2 \rho c$ $m_s = 0$
$y = \frac{4\pi R_0}{\lambda}$ $h(y) = 1 - \frac{2J_1(y)}{y}$ $g(y) = \frac{3\pi}{y^3} \frac{1}{2} K_1(y)$	$J_1(y)$ funcția Bessel de ordinul I $K_1(y) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{y^3}{1^2 \times 3} - \frac{y^5}{1^2 \times 3^2 + 5} + \frac{y^7}{1^2 \times 3^2 \times 5^2 \times 7} \mp \ldots \right)$
Putere disipată	$P_r = R_r \frac{v^2}{2} = R_r v_{ef}^2$

5. **Timpul de reverberație:** $T_1 = 13,8 \frac{4V}{Ac} = 13,8 \frac{4V}{\alpha S c}$

pentru aer la 20°C și 760 mm Hg	$T_1 = 0,161 \frac{V}{\alpha S}$ V este volumul încăperii, în m³ S — aria în plan a încăperii, în m²
absorbția acustică	$A = \alpha S$
presiunea acustică eficace într-un volum închis cu timpul de reverbarație T_1 și puterea P a sursei acustice, în W	$p_{ef} = 101,5 \sqrt{\frac{T_1 P}{V}}$ [N · m⁻²] $p_{ef} = 1015 \sqrt{\frac{T_1 P}{V}}$ [µbar]

Tabelul 2.35. **Valori numerice ale vitezei sunetului**

Materialul	Temperatura °C	Viteza sunetului m s^{-1}	
În gaze și vapori			
Aer	+ 500	558	
	+ 100	387,2	
	+ 20	343	
	0	331,8	
	− 20	319,3	
Bioxid de carbon	+ 100	297,2	
	+ 18	265,8	
Etilenă	0	371	
Heliu	0	971	
Hidrogen	+ 100	1643	
	+ 18	1301	
	0	1286	
În lichide			
Alcool	+ 20	1168	
Glicerină	+ 20	1923	
Mercur	+ 20	1451	
Ulei de parafină	+ 33,5	1420	
Apă (ușoară)	+ 25	1497	
Apă (grea)	+ 25	1401	
Apă de mare (conținut de sare 3,235%):			
la suprafață	0	1440	
	+ 15	1498	
la adîncime de 1500 m	0	1456	
	+ 15	1511	
		în bare $d \ll \lambda$	în medii infinite $d \gg \lambda$
În solide			
a) *Metale*			
Aluminiu	(ν — 0,34)	5240	6400
Alamă	(ν — 0,35)	3420	4250
Cupru	(ν — 0,35)	3580	4606
Fier	(ν — 0,27)	5170	5850
Plumb	(ν — 0,45)	1250	2400
Oțel		5050	6100
b) *Alte materiale*			
Lemn de fag (de-a lungul fibrelor)		3400	
Lemn de brad (de-a lungul fibrelor)		5260	
Degussir (oxid de aluminiu Degussa)		9600	
Sticlă		3490...5300	3760...5660
Granit		3950	
Gheață (−4°C)		3232	
Cuarț de cristal (în planul X)		5440	5720
Sare Seignette (la 45° în planul Y)		2740	
Nisip		100...300	
Cuarț sticlos		5370	5570

În materialele plastice viteza sunetului depinde foarte mult de temperatură și de frecvență.

Puteri ale unor surse acustice

Conversație (valoare mijlocie)		7.10^{-6} W
Puterea maximă a vocii umane		2.10^{-3} W
Vioară fortissimo		1.10^{-3} W
Pian cu coadă		3.10^{-1} W
Trompetă		3.10^{-1} W
Orgă	pînă la	10 W
Megafon mare	pînă la	10^{2} W
Emițător ultrasonic	pînă la	1 kW
Motor de avion cu reacție	cîțiva	kW
Rachetă interplanetară în timpul lansării	pînă la	100 MW

2.10.3. Intensitatea acustică, nivelul de tărie, tărie, nivelul acustic, spectrul acustic

Intensitate acustică

În gama sensibilității maxime a urechii, adică în gama de frecvență de circa 1000 Hz, intensitatea acustică a pragului de audibilitate și cea care provoacă un început de senzație dureroasă diferă între ele printr-un factor de 10^{13}. Din cauza acestei game largi de variație a intensității se utilizează de obicei o scară logaritmică, anume scara decibelilor (dB), și nu o scară liniară, pentru caracterizarea intensităților acustice. În prezent se utilizează în general scara logaritmică zecimală, care este astfel împărțită încît două intensități I_1 și I_2 să difere pe scară logaritmică prin 10 $\log_{10} I_1/I_2$ diviziuni de scară sau prin 20 $\log_{10} p_1/p_2$ dacă se iau ca bază presiunile acustice p_1 și p_2, ținînd seama că intensitatea acustică și presiunea acustică sînt legate între ele după o lege pătratică. Astfel, creșterea cu un factor 10 a intensității acustice corespunde la o creștere de 10 dB, o creștere cu factorul 100 corespunde la o creștere de 20 dB, iar creșterea cu factorul 10^{13} corespunde la o creștere de 130 dB. Nivelul absolut al presiunii acustice (pe scurt nivelul acustic) se exprimă în raport cu presiunea de referință, egală cu $2 \cdot 10^{-5}$ N/m² = $= 2 \cdot 10^{-4}$ μbar.

Nivelul de tărie

Sensibilitatea urechii diferă considerabil în cazul unor sunete pure de diferite înălțimi. În fig. 2.41 sînt reprezentate așa-numitele **contururi de egală tărie**. Curba cea mai de jos reprezintă variația în pragul de audibilitate (cîmpul audibil minim). Pentru determinarea subiectivă a nivelului de tărie se procedează astfel:

Cu ajutorul comparațiilor auditive se ajustează intensitatea fizică a sunetului standard de 1 000 Hz astfel încît el să aibă aceeași tărie ca și procesul acustic care se măsoară; atunci nivelul acustic al sunetului standard se utilizează cu coeficient pentru măsurarea nivelului de tărie al procesului acustic în cauză.

Pe baza observațiilor de mai sus se poate defini deci scara nivelului de tărie astfel:

Dacă I_1 și I_2 sînt două intensități acustice ale sunetului standard, atunci nivelele de tărie diferă cu 10 $\log_{10} I_1/I_2$ foni sau, dacă în locul intensităților acustice se specifică presiunile acustice p_1 și p_2, respectiv prin 20 $\log_{10} p_1/p_2$ foni.

Punctul de zero al nivelului de tărie se găsește la intensitatea acustică a sunetului standard „în condiții de cîmp liber", egală cu 10^{-12} W/m² = 10^{-16} W/cm². Aceasta înseamnă deci că 0 foni corespund la un sunet de 1 000 Hz avînd presiunea acustică $p_{ef} = 2 \cdot 10^{-5}$ Nm^{-2} = $2 \cdot 10^{-4}$ μbar (t = 20°C, p_0 = 736 mm Hg).

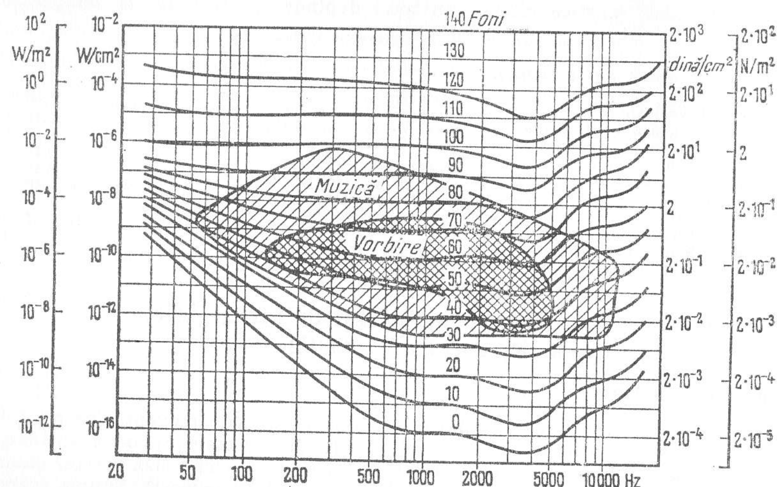


Fig. 2.41. Curbele de egală tărie: domeniul vorbirii şi al muzicii.

Nivelul de tărie al zgomotului (valori din experienţa practică)

Motoare de avion la distanţa de cîţiva metri)	peste 120 foni
Cazangerie	circa 110 foni
Burghie pneumatice	circa 90 foni
Strigăt puternic	circa 80 foni
Zgomot în străzi de oraş	circa 70 foni
Conversaţie obişnuită	circa 50 ... 70 foni
Zgomot în suburbii	circa 30 ... 40 foni
Ticăitul unui ceas de buzunar	circa 20 foni
Pragul de audibilitate:	0 foni

Tăria

Scara logaritmică a nivelului de tărie (scara fonilor) nu descrie în mod corect creşterea tăriei sensibile a sunetului prin creşterea excitaţiei fizice. Scara de tărie (a sonilor) este mai adecuată pentru tăria sensibilă a sunetului. La această scară se ajunge astfel: Se cere unor observatori să stabilească diferenţele de tărie pe scara fonilor corespunzătoare la dublarea sau înjumătăţirea tăriei percepute subiectiv, plecînd de la nivelul de tărie de 40 foni, care se adoptă în mod convenţional ca tărie 1. Relaţia determinată experimental dintre tăria N în soni şi nivelul de tărie Λ în foni poate fi exprimată satisfăcător prin relaţia $N = 2^{0,1(\Lambda-40)}$ (făcînd abstracţie de gama nivelelor de tărie foarte joase, de exemplu sub 20 foni). Recomandarea ISO R131 [1]) se bazează pe relaţia de convertire a fonului în son. Astfel, conform acestei relaţii tăria creşte cu un factor 2 la o creştere cu 10 foni a nivelului de tărie. Pentru un observator neiniţiat în ultilizarea scărilor logaritmice este adeseori mai uşor să definească o scădere a zgomotului pe scara tăriei decît pe scara nivelului de tărie.

[1] I.S.O. — Oficiu Internaţional de Standardizare.

Valorile tăriei se pot însuma, spre deosebire de valorile nivelului de tărie. Pe această proprietate se bazează o metodă de calcul al tăriei totale, pe baza tăriilor parţiale în aşa-numitele „grupe de frecvenţe" [după E. Zwicker [1])]. Lăţimea unui grup de frecvenţe se poate determina oferind urechii un zgomot alb cu o bandă de frecvenţă foarte îngustă, dar care creşte treptat şi cu o intensitate constantă, şi stabilind apoi acea lăţime a benzii la care se constată o mărire a tăriei.

Trebuie să se ţină seama că la tăriile parţiale se adaugă anumite efecte de mascare din grupe de frecvenţă învecinate.

Măsurarea nivelului acustic

Măsurarea obiectivă a nivelului acustic se poate efectua cu ajutorul aparatelor pentru măsurarea nivelului acustic — al hipsometrelor —, în particular cu ajutorul hipsometrelor de precizie. În aceste dispozitive, diferitele componente conţinute într-un proces acustic sînt evaluate în funcţie de ponderea lor de frecvenţă faţă de sensibilitatea urechii. Aprecierea se face prin amplificarea dependentă de frecvenţă. În hipsometrul corespunzător normelor germane DIN se utilizează mai multe curbe cunoscute de frecvenţă şi anume „curba de ponderare A", „curba de ponderare B" şi „curba de ponderare C" (fig. 2.42).

Aceste curbe de frecvenţă se pot introduce după dorinţă. „Curba *A*" corespunde în linii generale curbei de nivel al tăriei de 30 foni, „curba *B*" corespunde curbei de nivel al tăriei de 60 foni, iar „curba *C*" transmite uniform hipsometrului frecvenţe cuprinse în gama dintre aproximativ 50 Hz şi 8000 Hz. Domeniul de transmisie uniformă se

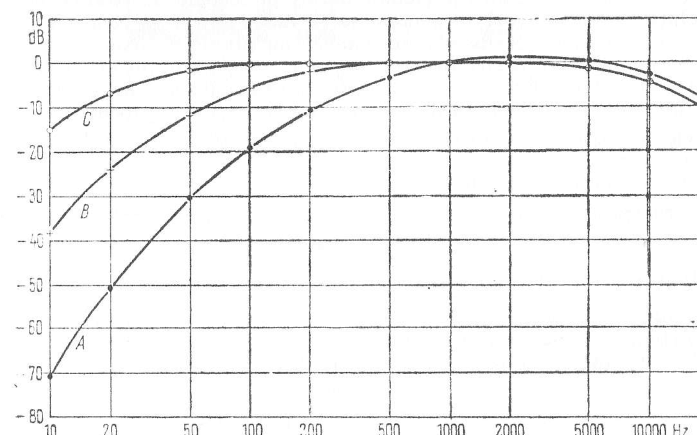


Fig. 2.42. Curbele de ponderare A, B şi C ale hipsometrului de precizie.

extinde şi mai mult în „poziţia liniară". Datele măsurate sînt indicate cu ajutorul unui aparat de măsurat valorile eficace, cu un timp de stabilizare suficient de scurt ($\simeq$ 250 ms). Valoarea indicată în dB de către hipsometrul de precizie (raportată din nou la nivelul acustic de referinţă $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{Nm}^{-2} = 2 \cdot 10^{-4}\,\mu\mathrm{bar}$) se numeşte *nivelul de pre-*

[1]) E. Zwicker, în: Acustica, 10, 304 (1960); J. Acoust Soc. Amer., 33, 248 (1961).

siune acustică absolută L, sau pe scurt, *nivelul acustic*, respectiv *nivelul acustic „ponderat A,“ „ponderat B“, „ponderat C“*, notate cu L_A, L_B, L_C cînd se utilizează curbele de ponderare[1] A, B, sau respectiv C.

Ponderea A se utilizează aproape exclusiv în practică, iar nivelul acustic ponderat A constituie în prezent valoarea prescrisă în normele şi standardele de măsurare.

Nivelele acustice se exprimă în decibeli (dB), de exemplu nivelul acustic ponderat A (nivelul ponderat A al presiunii acustice) este de 70 dB. Prescurtarea 70 dB (A) este permisă în calcule şi tabele, ea indicînd că cifra măsurată s-a obţinut cu curba de ponderare A.

Nivelul acustic constituie o măsură obiectivă a unei intensităţi acustice ponderate. Deoarece ponderarea frecvenţelor ţine seama în principal numai de o singură proprietate a organului auzului şi anume de dependenţa de frecvenţă a acestuia, făcînd abstracţie de alte proprietăţi importante cum sînt compoziţia globală a tăriei (tăriile parţiale), nivelul acustic ponderat trebuie conceput nu ca o mărime de măsurat care simulează nivelul de tărie, ci ca o mărime de măsurat independentă, fizic definită, care reprezintă o măsură practică a intensităţii şi este limitată la partea activă din punct de vedere audiofiziologic a spectrului acustic.

Spectrul acustic

Alte date privitoare la compoziţia unui sunet se pot obţine din studiul repartiţiei spectrale a intensităţii în gama de frecvenţe. De obicei, în cercetarea practică a zgomotului, nu este necesar să se utilizeze metode bazate pe fenomenul bătăilor, cu mare putere de rezoluţie; este suficient în general să se descompună spectrul cu ajutorul filtrelor de bandă. Filtrele trece-bandă de octavă sau filtrele de bandă de o treime de octavă îşi găsesc o largă utilizare în acest domeniu. Reprezentînd grafic în funcţie de frecvenţă nivelul acustic determinat în benzile individuale prin intercalarea de filtre, se poate obţine nivelul de octavă sau de o treime de octavă a procesului acustic.

Spectrele acustice oferă specialiştilor mai multe detalii asupra componentelor principale ale zgomotului global şi permit o analiză mai riguroasă a tipului particulare de zgomot şi a căilor pentru reducerea acestuia.

Cu ajutorul spectrelor de octavă a treia se pot calcula tăria totală în soni şi nivelul de tărie în soni.

Prescripţii pentru măsurarea zgomotului maşinilor electrice[2]

În standardele germane nivelul de tărie se măsoară cu nivelul ponderat al presiunii acustice, utilizîndu-se pentru maşinile electrice valoarea de ponderare „A“. Nivelul presiunii acustice se raportează la presiunea acustică de referinţă

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}\text{Nm}^{-2} = 2 \cdot 10^{-4}\ \mu\text{bar}.$$

Punctele de măsurare trebuie să se amplaseze în spaţiul care înconjoară maşinile la o distanţă de 1 m de la suprafaţa exterioară a acestora. În această situaţie, intensitatea zgomotului produs de maşină se calculează ca valoare medie.

[1] Înainte se utiliza un hipsometru care cupla „curbele de ponderare A şi B“ cu domenii de măsurare a nivelului, astfel încît „curba de ponderare A“ se utiliza întotdeauna pentru nivele sub 60 dB, pe cînd „curba de ponderare“B se utiliza întotdeauna pentru nivelele de peste 60 dB.

[2] V. STAS 7301-65 „Maşini electrice rotative. Metode de măsurare a nivelului zgomotului“.

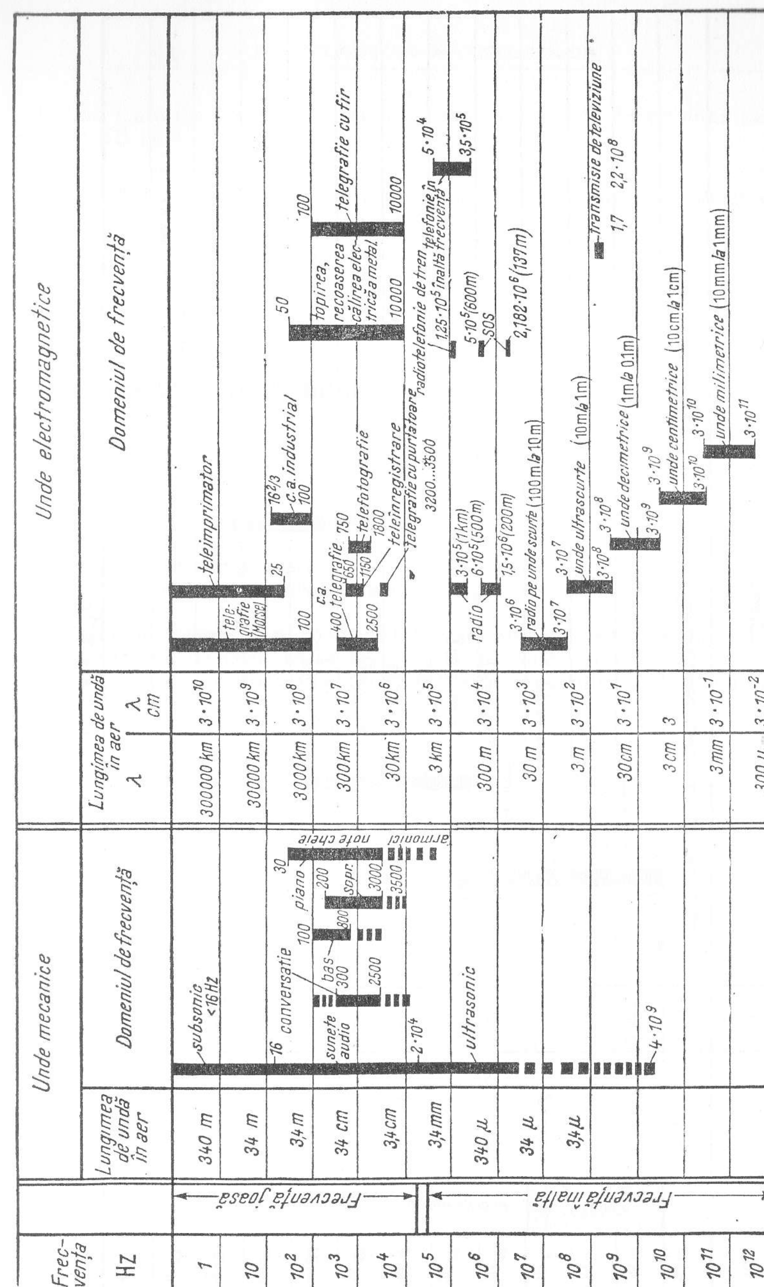
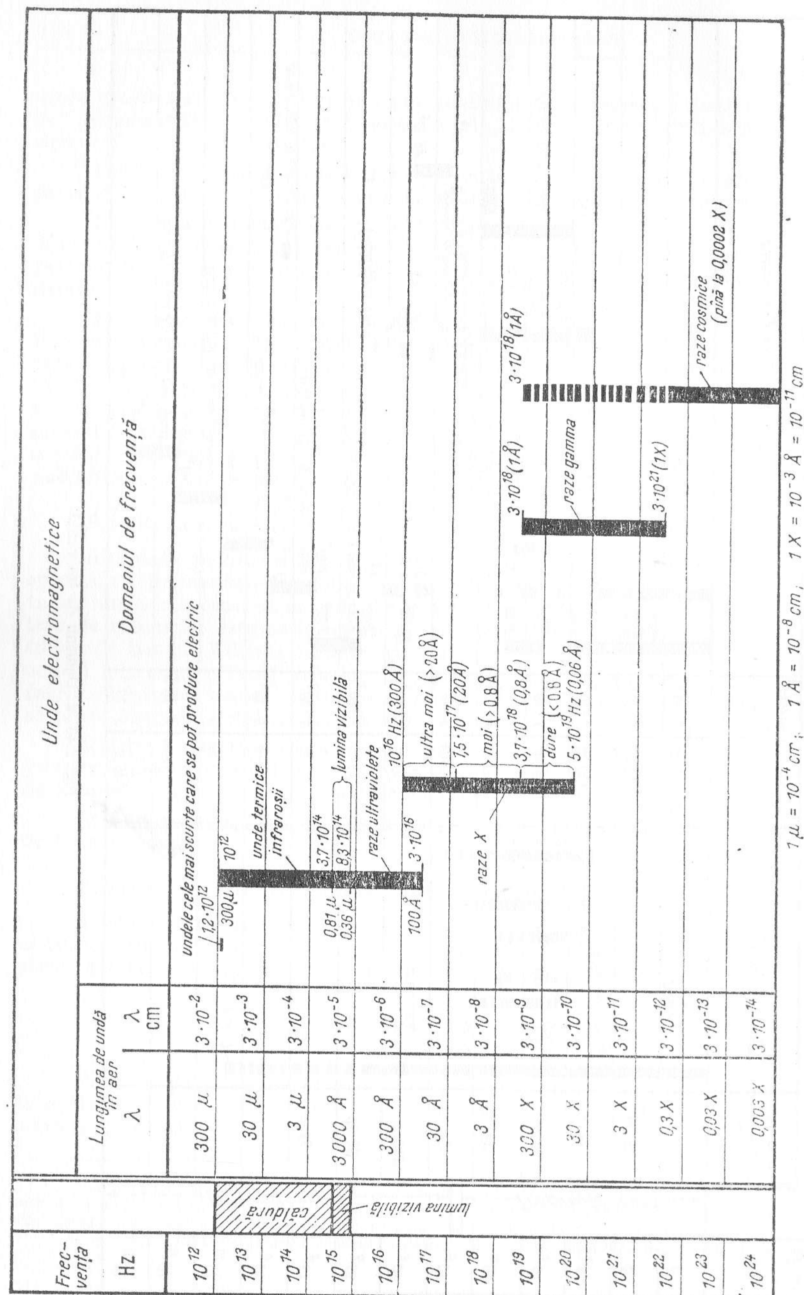


Fig. 2.43, a. Domenii de frecvenţă.



$1\,\mu = 10^{-4}\,cm$; $1\,Å = 10^{-8}\,cm$; $1\,X = 10^{-3}\,Å = 10^{-11}\,cm$

Fig. 2.43, b. Domenii de frecvență

Pentru mașinile electrice se admit următoarele nivele de presiune acustică, exprimate în dB (A):

Puterea nominală kW		Răcire internă la turația rot/min				Răcire la suprafață la turația rot/min			
de la	pînă la	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
		dB (A)				dB (A)			
–	45	85	80	78	75	89	85	80	78
45	132	90	85	82	80	94	90	88	85
132	400	95	90	86	83	95	93	90	88
400	1250	–	92	90	88	97	95	93	93

Nivelul mediu al presiunii acustice la o distanță dată de la suprafața mașinii limitează de asemenea puterea acustică emisă de o mașină de o mărime dată (fiind date puterea și turația ei).

Comparînd așa dar puterea acustică a unor mașini avînd același gabarit este suficient să se compare între ele nivelele medii ale presiunii acustice $L_{p,1m}$ la distanța de 1 m.

Atunci cînd trebuie să se compare între ele zgomotele emise de mașini de mărimi foarte diferite, este de dorit să se dispună de informații suplimentare asupra ariei S (în m²) a suprafeței de măsurare (v. ISO R495) și să se calculeze nivelul puterii acustice (pentru condiții normale) conform relației

$$L_P = L_{p,1m} + 10\lg\frac{S}{1\ \mathrm{m}^2} \qquad [\mathrm{dB\ sau\ }10^{-12}\ \mathrm{W}].$$

3. METODE DE CALCUL ÎN ELECTROTEHNICĂ

3.1. FORMULE MATEMATICE

3.1.1. Formule de aproximație pentru funcții circulare, hiperbolice, exponențiale și serii binomiale

Tabelul 3.1. Funcții circulare (trigonometrice)

$f(x) \approx f_g(x)$	$\Delta \leqslant 0,1\%$	$\Delta \leqslant 1\%$	$\Delta \leqslant 10\%$
$\sin x \approx x$	$\pm$ 0,077	$\pm$ 0,24	$\pm$ 0,7
$\sin x \approx x - \frac{x^3}{6}$	$\pm$ 0,581	$\pm$ 1,01	$\pm$ 1,7
$\cos x \approx 1$	$\pm$ 0,045	$\pm$ 0,14	$\pm$ 0,4
$\cos x \approx 1 - \frac{x^2}{2}$	$\pm$ 0,386	$\pm$ 0,66	$\pm$ 1,0
$\mathrm{tg}\, x \approx x$	$\pm$ 0,055	$\pm$ 0,17	$\pm$ 0,5
$\mathrm{tg}\, x \approx x + \frac{x^3}{3}$	$\pm$ 0,294	$\pm$ 0,52	$\pm$ 0,9
$\mathrm{ctg}\, x \approx \frac{1}{x}$	$\pm$ 0,055	$\pm$ 0,17	$\pm$ 0,5
$\mathrm{ctg}\, x \approx \frac{1}{x} - \frac{x}{3}$	$\pm$ 0,450	$\pm$ 0,76	$\pm$ 1,2
$\frac{1}{\cos x} \approx 1$	$\pm$ 0,045	$\pm$ 0,14	$\pm$ 0,4
$\frac{1}{\cos x} \approx 1 + \frac{x^2}{2}$	$\pm$ 0,264	$\pm$ 0,47	$\pm$ 0,8
$\frac{1}{\sin x} \approx \frac{1}{x}$	$\pm$ 0,077	$\pm$ 0,24	$\pm$ 0,8
$\frac{1}{\sin x} \approx \frac{1}{x} + \frac{x}{6}$	$\pm$ 0,478	$\pm$ 0,86	$\pm$ 1,6

Formulele de aproximație sînt valabile (pentru argument natural în radiani) cu o precizie de 0,1 : 1 și 10% în cadrul limitelor indicate pentru domeniul x

Definiția erorii

$$\Delta = \frac{f_g(x) - f(x)}{f(x)}$$

$f(x)$ funcția exactă

$f_g(x)$ funcție aproximată

Tabelul 3.2. Funcții de arc

$f(x) \approx f_g(x)$	$\Delta \leqslant 0,1\%$	$\Delta \leqslant 1\%$	$\Delta \leqslant 10\%$
$\arcsin x \approx x$	$\pm$ 0,077	$\pm$ 0,24	$\pm$ 0,7
$\arcsin x \approx x + \frac{x^3}{6}$	$\pm$ 0,335	$\pm$,58	$\pm$ 0,9
$\mathrm{arc\,tg}\, x \approx x$	$\pm$ 0,055	$\pm$ 0,17	$\pm$ 0,6
$\mathrm{arc\,tg}\, x \approx x - \frac{x^3}{3}$	$\pm$ 0,268	$\pm$ 0,48	$\pm$ 0,9
$\mathrm{arc\,tg}\, \lvert x \rvert \approx \frac{\pi}{2}$	637 ... ∞	64 . ... ∞	6, ... ∞
$\mathrm{arc\,tg}\, \lvert x \rvert \approx \frac{\pi}{2} - \frac{1}{\lvert x \rvert}$	6,15 ... ∞	2,9 ... ∞	1,4 ... ∞

Tabelul 3.3. Funcții hiperbolice

$f(x) \approx f_g(x)$	$\Delta \leqslant 0,1\%$	$\Delta \leqslant 1\%$	$\Delta \leqslant 10\%$
$\mathrm{sh}\, x \approx x$	$\pm$ 0,077	$\pm$ 0,24	$\pm$ 0,8
$\mathrm{sh}\, x \approx x + \frac{x^3}{6}$	$\pm$ 0,596	$\pm$ 1,09	$\pm$ 2,1
$\mathrm{ch}\, x \approx 1$	$\pm$ 0,045	$\pm$ 0,14	$\pm$ 0,4
$\mathrm{ch}\, x \approx 1 + \frac{x^3}{2}$	$\pm$ 0,401	$\pm$ 0,74	$\pm$ 1,5
$\mathrm{th}\, x \approx x$	$\pm$ 0,055	$\pm$ 0,17	$\pm$ 0,6
$\mathrm{th}\, x \approx x - \frac{x^3}{3}$	$\pm$ 0,295	$\pm$ 0,52	$\pm$ 0,9
$\mathrm{coth}\, x \approx \frac{1}{x}$	$\pm$ 0,055	$\pm$ 0,17	$\pm$ 0,6
$\mathrm{coth}\, x \approx \frac{1}{x} + \frac{x}{3}$	$\pm$ 0,471	$\pm$ 0,88	$\pm$ 1,8
$\frac{1}{\mathrm{ch}\, x} \approx 1$	$\pm$0 ,045	$\pm$ 0,14	$\pm$ 0,4
$\frac{1}{\mathrm{ch}\, x} \approx 1 - \frac{x^3}{2}$	$\pm$ 0,263	$\pm$ 0,46	$\pm$ 0,8
$\frac{1}{\mathrm{sh}\, x} \approx \frac{1}{x}$	$\pm$ 0,077	$\pm$ 0,24	$\pm$
$\frac{1}{\mathrm{sh}\, x} \approx \frac{1}{x} - \frac{x}{6}$	$\pm$ 0,474	$\pm$ 0,84	$\pm$ 1,5
$\mathrm{th}\, \lvert x \rvert \approx 1$	3,80 ... ∞	2,64 ... ∞	1,5 ... ∞
$\mathrm{th}\, \lvert x \rvert \approx 1 - 2e^{-2\lvert x \rvert}$	1,91 ... ∞	1,34 ... ∞	0,8 ... ∞
$\mathrm{coth}\, \lvert x \rvert \approx 1$	3,80 ... ∞	2,64 ... ∞	1,5 ... ∞
$\mathrm{coth}\, \lvert x \rvert \approx 1 + 2e^{-2\lvert x \rvert}$	1,90 ... ∞	1,31 ... ∞	0,7 ... ∞

Tabelul 3.4. Funcții de arie

$f(x) \approx f_g(x)$	$\Delta \leqslant 0{,}1\%$	$\Delta \leqslant 1\%$	$\Delta \leqslant 10\%$
$\text{arg sh } x \approx x$	$\pm$ 0,077	$\pm$ 0,25	$\pm$ 0,8
$\text{arg sh } x \approx x - \frac{x^3}{6}$	$\pm$ 0,323	$\pm$ 0,63	$\pm$ 1,2
$\text{arg th } x \approx x$	$\pm$ 0,055	$\pm$ 0,17	$\pm$ 0,5
$\text{arg th } x \approx x + \frac{x^3}{3}$	$\pm$ 0,264	$\pm$ 0,46	$\pm$ 0,8

Tabelul 3.5. Funcții exponențiale și logaritmice

$f(x) \approx f_g(x)$	$\Delta \leqslant 0{,}1\%$	$\Delta \leqslant 1\%$	$\Delta \leqslant 10\%$
$e^x \approx 1 + x$	− 0,044 ... +0,045	−0,14... + 0,15	− 0,4... + 0,5
$e^x \approx 1 + x + \frac{x^2}{2}$	− 0,174... + 0,191	−0,36... + 0,44	− 0,7... + 1,1
$\ln(1 + x) \approx x$	− 0,002... + 0,002	−0,02... + 0,02	− 0,2... + 0,2
$\ln(1 + x) \approx x - \frac{x^2}{2}$	− 0,054... + 0,054	−0,17... + 0,18	− 0,5... + 0,6
$\ln(1 + x) \approx 2z$	− 0,104... + 0,116	−0,29... + 0,42	− 0,7... + 2,2
$\ln(1 + x) \approx 2\left(z + \frac{z^3}{3}\right)$	− 0,418... + 0,719	−0,63... + 1,72	− 0,9... + 6,9
$\ln x \approx 2y$	+ 0,896... + 1,116	+0,71... + 1,42	+ 0,3... + 3,2
$\ln x \approx 2\left(y + \frac{y^3}{3}\right)$	+ 0,582... + 1,718	+0,37... + 2,72	+ 0,1... + 7,9

În acest tabel

$$y = \frac{x - 1}{x + 1}, \quad z = \frac{x}{x + 2}.$$

Formule auxiliare:

$$\ln(a + \delta) = \ln a + \ln(1 + x) \quad \text{unde } x = \delta/a, \quad a > 0, \ \delta > -a.$$

Erorile indicate se vor multiplica în cazul de față cu a.
Logaritmii lui Brigg (zecimali),

$$\log_{10}(1 + x) = \lg(1 + x) = \mathrm{M} \ln(1 + x)$$

unde M = 0,4343.

Tabelul 3.6. Serii binom $(1 + x)^n$

$f(x) \approx f_g(x)$	$\Delta \leqslant 0{,}1\%$	$\Delta \leqslant 1\%$	$\Delta \leqslant 10\%$
$(1 + x)^3 \approx 1 + 3x$	− 0,018... + 0,019	− 0,05... + 0,06	− 0,1... + 0,2
$(1 + x)^2 \approx 1 + 2x$	− 0,031... + 0,033	− 0,09... + 0,11	− 0,2... + 0,4
$\sqrt{1 + x} \approx 1 + \frac{1}{2} x$	− 0,086... + 0,094	− 0,25... + 0,33	− 0,6... + 1,4
$\sqrt[3]{1 + x} \approx 1 + \frac{1}{3} x$	− 0,091... + 0,099	− 0,26... + 0,34	− 0,6... + 1,4
$\frac{1}{\sqrt[3]{1 + x}} \approx 1 - \frac{1}{3} x$	− 0,066... + 0,068	− 0,20... + 0,22	− 0,6... + 0,8
$\frac{1}{\sqrt{1 + x}} \approx 1 - \frac{1}{2} x$	− 0,051... + 0,052	− 0,16... + 0,17	− 0,5... + 0,6
$\frac{1}{(1 + x)} \approx 1 - x$	− 0,031... + 0,031	− 0,10... + 0,10	− 0,3... + 0,3
$\frac{1}{(1 + x)^2} \approx 1 - 2x$	− 0,018... + 0,018	− 0,06... + 0,05	− 0,2... + 0,2
$\frac{1}{(1 + x)^3} \approx 1 - 3x$	− 0,013... + 0,013	− 0,04... + 0,04	− 0,1... + 0,1

3.1.2. Serii finite și infinite

Formulele sumelor seriilor finite

Serii aritmetice

$$S_0 = \sum_{\nu=0}^{n-1} a_0 = n a_0;$$

$$S_1 = \sum_{\nu=0}^{n-1} \left[a_1 + \binom{\nu}{1} a_0\right] = \binom{n}{1} a_1 + \binom{n}{2} a_0;$$

$$S_2 = \sum_{\nu=0}^{n-1} \left[a_2 + \binom{\nu}{1} a_1 + \binom{\nu}{2} a_0\right] = \binom{n}{1} a_2 + \binom{n}{2} a_1 + \binom{n}{3} a_0;$$

$$\vdots$$

$$S_m = \sum_{\nu=0}^{n-1} \sum_{\mu=0}^{m} \binom{\nu}{\mu} a_{m-\mu} = \binom{n}{1} a_m + \binom{n}{2} a_{m-1} + \ldots + \binom{n}{m+1} a_0.$$

Serii geometrice

$$S = a + ax + ax^2 + \cdots + ax^{n-1} = a\frac{x^n - 1}{x - 1}.$$

Sume de puteri:

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^0 = \frac{1}{1} n \qquad = n;$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^1 = \frac{1}{2} n^2 + \frac{1}{2} n \qquad = \frac{n(n+1)}{2};$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^2 = \frac{1}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 + \frac{1}{6} n \qquad = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6};$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^3 = \frac{1}{4} n^4 + \frac{1}{2} n^3 + \frac{1}{4} n^2 \qquad = \left[\frac{n(n+1)}{2}\right]^2;$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^4 = \frac{1}{5} n^5 + \frac{1}{2} n^4 + \frac{1}{3} n^3 - \frac{1}{30} n = \frac{n(n+1)(2n+1)(3n^2+3n-1)}{30};$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^5 = \frac{1}{6} n^6 + \frac{1}{2} n^5 + \frac{5}{12} n^4 - \frac{1}{12} n^2 = \frac{n^2 + (n+1)^2 (2n^2 + 2n - 1)}{12};$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^6 = \frac{1}{7} n^7 + \frac{1}{2} n^6 + \frac{1}{2} n^5 - \frac{1}{6} n^3 + \frac{1}{42} n;$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^7 = \frac{1}{8} n^8 + \frac{1}{2} n^7 + \frac{1}{12} n^6 - \frac{7}{24} n^4 + \frac{1}{12} n^2;$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^8 = \frac{1}{9} n^9 + \frac{1}{2} n^8 + \frac{2}{3} n^7 - \frac{7}{15} n^5 + \frac{2}{9} n^3 - \frac{1}{30} n;$$

$$\sum_{\nu=1}^{n} \nu^9 = \frac{1}{10} n^{10} + \frac{1}{2} n^9 + \frac{3}{4} n^8 - \frac{7}{10} n^6 + \frac{1}{2} n^4 - \frac{3}{20} n^2.$$

Serii binomiale cu exponenți întregi și pozitivi:

$$(a+b)^n = \sum_{\nu=0}^{n} \binom{n}{\nu} a^{n-\nu} b^\nu = a^n + \binom{n}{1} a^{n-1} b + \binom{n}{2} a^{n-2} b^2 + \ldots + b^n;$$

$$(1+x)^n = \sum_{\nu=0}^{n} \binom{n}{\nu} x^\nu \qquad = 1 + \binom{n}{1} x + \binom{n}{2} x^2 + \ldots + x^n;$$

$$(1-x)^n = \sum_{\nu=0}^{n} \binom{n}{\nu} (-x)^\nu = 1 - \binom{n}{1} x + \binom{n}{2} x^2 - \ldots + (-x^n).$$

Serii de puteri

Serii Taylor

$$f(x) = f(x_0) + \frac{h}{1!} f'(x_0) + \frac{h^2}{2!} f''(x_0) + \ldots + \frac{h^{n-1}}{(n-1)!} f^{(n-1)}(x_0) + R_n,$$

$$h = x - x_0, \qquad R_n = \frac{h^n}{n!} f^{(n)}(x_0 + \vartheta h), \qquad 0 < \vartheta < 1;$$

$$f(x) = f(0) + \frac{x}{1!} f'(0) + \frac{x^2}{2!} f''(0) + \ldots + \frac{x^{n-1}}{(n-1)!} f^{(n-1)}(0) + R_n,$$

$$h = x - 0, \qquad R_n = \frac{x^n}{n!} f^{(n)}(\vartheta x), \qquad 0 < \vartheta < 1.$$

Serii binomiale cu puteri generalizate

$$(1+x)^\alpha = 1 + \binom{\alpha}{1} x + \binom{\alpha}{2} x^2 + \ldots + \binom{\alpha}{n} x^n + \ldots = \sum_{\nu=0}^{\infty} \binom{\alpha}{v} x^\nu.$$

Seria este convergentă pentru

$|x| < 1$, pentru $x = -1$, $\alpha > 0$ și pentru $x = +1$, $\alpha > -1$.

Coeficientul binomial

$$\binom{\alpha}{\nu} = \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)\ldots(\alpha-v+1)}{1 \times 2 \times 3 \ldots v};$$

$$(1+x)^{-1} = 1 - x + x^2 - x^3 + - \ldots \qquad -1 < x < +1;$$

$$(1-x)^{-1} = 1 + x + x^2 + x^3 + \ldots \qquad -1 < x < +1;$$

$$(1+x)^{+\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2} x - \frac{1}{2 \times 4} x^2 + \frac{1 \times 3}{2 \times 4 \times 6} x^3 - + \ldots \qquad -1 \leqq x \leqq +1;$$

$$(1-x)^{+\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2}x - \frac{1}{2\times 4}x^2 - \frac{1\times 3}{2+4\times 6}x^3 - \dots \qquad -1 \leqq x \leqq +1;$$

$$(1+x)^{-\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2}x + \frac{1\times 3}{2\times 4}x^2 - \frac{1\times 3\times 5}{2\times 4\times 6}x^3 + - \dots \qquad -1 < x \leqq +1.$$

$$(1-x)^{-\frac{1}{2}} = 1 + \frac{1}{2}x + \frac{1\times 3}{2\times 4}x^2 + \frac{1\times 3\times 5}{2\times 4\times 6}x^3 + \dots \qquad -1 \leqq x < +1.$$

Serii exponenţiale şi logaritmice:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots;$$

$$e^{jx} = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \frac{x^8}{8!} - \dots + j\left[x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots\right];$$

$$\frac{x}{e^x - 1} = 1 + B_1\frac{x}{1!} + B_2\frac{x^2}{2!} + B_4\frac{x^4}{4!} + \dots \qquad |x| < 2\pi;$$

$$\frac{2}{e + e^{-x}} = 1 + E_2\frac{x}{2!} + E_4\frac{x^4}{4!} + E_6\frac{x^6}{6!} + \dots \qquad |x| < \frac{\pi}{2};$$

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots + \frac{(-1)^{\nu+1}x^\nu}{v} + - \dots \qquad 0 \leqq x \leqq 1;$$

$$\ln\frac{1+x}{1-x} = \ln y = 2\left[x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \dots + \frac{x^{2\nu+1}}{2\nu+1} + \dots\right] \qquad x = \frac{y-1}{y+1};$$

$$\ln(a+x) = \ln a + 2\left[z + \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{5} + \dots + \frac{z^{2\nu+1}}{2\nu+1} + \dots\right] \qquad z = \frac{x}{2a+x}.$$

$$\mathrm{Ei}(x) = C + \ln|x| + \frac{x}{1\times 1!} + \frac{x^2}{2+2!} + \dots = \int_\infty^{-x}\frac{e^{-x}}{x}\,dx;$$

$$\mathrm{Chi}(x) = C + \ln|x| + \frac{x^2}{2\times 2!} + \frac{x^4}{4\times 4!} + \dots = \int_0^x \frac{\mathrm{ch}\,x - 1}{x}\,dx + \ln|x| + C;$$

$$\mathrm{Shi}(x) = \frac{x}{1\times 1!} + \frac{x^3}{3\times 3!} + \frac{x^5}{5\times 5!} + \dots = \int_0^x \frac{\mathrm{sh}\,x}{x}\,dx;$$

$$\mathrm{Ci}(x) = C + \ln|x| - \frac{x^2}{2+2!} + \frac{x^4}{4\times 4!} - + \dots = -\int_x^\infty \frac{\cos x}{x}\,dx;$$

$$\mathrm{Si}(x) = \frac{x}{1\times 1!} - \frac{x^3}{3\times 3!} + \frac{x^5}{5\times 5!} - + \dots = \int_0^x \frac{\sin x}{x}\,dx;$$

$$\frac{\sqrt{\pi}}{2}\Phi(x) = \frac{x}{1\times 0!} - \frac{x^3}{3\times 1!} + \frac{x^5}{5\times 2!} - + \dots = \int_0^x e^{-x^2}\,dx;$$

$$\sqrt{\frac{\pi}{2}}\,S(x) = \sqrt{x}\left[\frac{x}{3\times 1!} - \frac{x^3}{7\times 3!} + \frac{x^5}{11\times 5!} - + \dots\right] = \int_0^{\sqrt{x}} \sin x^2\,dx;$$

$$\sqrt{\frac{\pi}{2}}\,C(x) = \sqrt{x}\left[\frac{1}{1\times 1!} - \frac{x^2}{5\times 2!} + \frac{x^4}{9\times 4!} - + \dots\right] = \int_0^{\sqrt{x}} \cos x^2\,dx.$$

Constanta Euler este $C = 0{,}577216$; pentru numerele Bernoulli B_ν şi numerele Euler E_ν — v. pag. 142.

Funcţii circulare (trigonometrice) şi hiperbolice ($\nu = 1, 2, 3, \dots$):

$$\cos x = 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4 - \frac{1}{720}x^6 + - \dots + \frac{(-1)^\nu}{(2\nu)!}x^{2\nu};$$

$$\cos^2 x = 1 - x^2 + \frac{1}{3}x^4 - \frac{2}{45}x^6 + - \dots;$$

$$\cos^3 x = 1 - \frac{3}{2}\,{}^2 + \frac{7}{8}x^4 - \frac{61}{240}x^6 + - \dots;$$

$$\cos^4 x = 1 - 2x^2 + \frac{5}{3}x^4 - \frac{34}{45}x^6 + - \dots;$$

$$\sin x = x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 - \frac{1}{5040}x^7 + - \dots + \frac{(-1)^\nu}{(2\nu+1)!}x^{2\nu+1};$$

$$\sin^2 x = x^2 - \frac{1}{3}x^4 + \frac{2}{45}x^6 - \frac{1}{315}x^8 + - \ldots;$$

$$\sin^3 x = x^3 - \frac{1}{2}x^5 + \frac{13}{120}x^7 - \frac{41}{3024}x^9 + - \ldots;$$

$$\sin^4 x = x^4 - \frac{2}{3}x^6 + \frac{1}{5}x^8 - \frac{102}{2835}x^{10} + - \ldots;$$

$$\operatorname{tg} x = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 + \frac{17}{315}x^7 + \ldots + (-1)^{\nu-1}\frac{2^{2\nu}}{(2\nu)!}(2^{2\nu}-1)B_{2\nu}x^{2\nu-1};$$

$$\operatorname{cotg} x = \frac{1}{x} - \frac{1}{3}x - \frac{1}{45}x^3 - \frac{2}{945}x^5 - \ldots + (-1)^{\nu}\frac{2^{2\nu}}{(2\nu)!}B_{2\nu}x^{2\nu-1};$$

$$\frac{1}{\cos x} = 1 + \frac{1}{2}x^2 + \frac{5}{24}x^4 + \frac{61}{720}x^6 + \ldots + (-1)^{\nu}\frac{1}{(2\nu)!}E_{2\nu}x^{2\nu};$$

$$\frac{1}{\sin x} = \frac{1}{x} + \frac{1}{6}x + \frac{7}{360}x^3 + \frac{31}{15120}x^5 + \ldots + (-1)^{\nu-1}\frac{1}{(2\nu)!}(2^{2\nu}-2)B_{2\nu}x^{2\nu-1};$$

$$\operatorname{ch} x = 1 + \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4 + \frac{1}{720}x^6 + \ldots + \frac{1}{(2\nu)!}x^{2\nu};$$

$$\operatorname{sh} x = x + \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 + \frac{1}{5040}x^7 + \ldots + \frac{1}{(2\nu+1)!}x^{2\nu+1};$$

$$\operatorname{th} x = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{2}{15}x^5 - \frac{17}{315}x^7 + - \ldots + (2^{2\nu}-1)\frac{2^{2\nu}}{(2\nu)!}B_{2\nu}x^{2\nu-1};$$

$$\operatorname{coth} x = \frac{1}{x} + \frac{1}{3}x - \frac{1}{45}x^3 + \frac{2}{945}x^5 - + \ldots + \frac{2^{2\nu}}{(2\nu)!}B_{2\nu}x^{2\nu-1}.$$

Produse ale funcțiilor circulare și hiperbolice

$$\sin x \cdot \operatorname{sh} x = \frac{2^1}{2!}x^2 - \frac{2^3}{6!}x^6 + \frac{2^5}{10!}x^{10} - \frac{2^7}{14!}x^{14} + - + - \ldots;$$

$$\sin x \cdot \operatorname{ch} x = \frac{2^0}{1!}x + \frac{2^1}{3!}x^3 - \frac{2^2}{5!}x^5 - \frac{2^3}{7!}x^7 + + - - \ldots,$$

$$\cos x \cdot \operatorname{sh} x = \frac{2^0}{1!}x - \frac{2^1}{3!}x^3 - \frac{2^2}{5!}x^5 + \frac{2^3}{7!}x^7 + - - + \ldots,$$

$$\cos x \cdot \operatorname{ch} x = \frac{2^0}{1!} - \frac{2^2}{4!}x^4 + \frac{2^4}{8!}x^8 - \frac{2^6}{12!}x^{12} + - + - \ldots,$$

Funcții inverse ale funcțiilor hiperbolice și ale celor circulare (trigonometrice):

$$\operatorname{arg\,sh} x = x - \frac{1}{2}\frac{x^3}{3} + \frac{1\times3}{2\times4}\frac{x^5}{5} - \frac{1\times3\times5}{2\times4\times6}\frac{x^7}{7} + - \ldots \quad -1 < x < +1;$$

$$\operatorname{arg\,sh} x = \operatorname{sgn} x\left[\ln|2x| + \frac{1}{2}\frac{1}{2x^2} - \frac{1\times3}{2\times4}\frac{1}{4x^4} + \frac{1\times3\times5}{2\times4\times6}\frac{1}{6x^6} - + \ldots\right] \quad |x| \geqslant 1;$$

$$\operatorname{arg\,ch} x = \ln 2x - \frac{1}{2}\frac{1}{2x^2} - \frac{1\times3}{2\times4}\frac{1}{4x^4} + \frac{1\times3\times5}{2\times4\times6}\frac{1}{6x^6} - \ldots \quad +1 \leq x;$$

$$\operatorname{arg\,th} x = x + \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{7}x^7 + \ldots \quad -1 < x < +1;$$

$$\operatorname{arg\,coth} x = \frac{1}{x} + \frac{1}{3x^3} + \frac{1}{5x^5} + \frac{1}{7x^7} + \ldots \quad x < -1\ +1 < x;$$

$$\arcsin x = x + \frac{1}{2}\frac{x^3}{3} - \frac{1\times3}{2\times4}\frac{x^5}{5} + \frac{1\times3\times5}{2\times4\times6}\frac{x^7}{7} + \ldots \quad -1 < x < +1;$$

$$\arccos x = \frac{\pi}{2} - x - \frac{1}{2}\frac{x^3}{3} - \frac{1\times3}{2\times4}\frac{x^5}{5} - \frac{1\times3\times5}{2\times4\times6}\frac{x^7}{7} - \ldots \quad -1 < x < +1;$$

$$\operatorname{arc\,tg} x = x - \frac{1}{3}x^3 + \frac{1}{5}x^5 - \frac{1}{7}x^7 + - \ldots \quad -1 < x < +1;$$

$$\operatorname{arc\,ctg} x = \frac{1}{x} - \frac{1}{3}\frac{1}{x^3} + \frac{1}{5}\frac{1}{x^5} - \frac{1}{7}\frac{1}{x^7} + - \ldots \quad +1 < x;$$

$$= \pi + \frac{1}{x} - \frac{1}{3}\frac{1}{x^3} + \frac{1}{5}\frac{1}{x^5} - \frac{1}{7}\frac{1}{x^7} + - \ldots \quad x < -1.$$

Numerele Bernoulli

$$B_1 = -\frac{1}{2}, \quad B_2 = +\frac{1}{6}, \quad B_4 = -\frac{1}{30}, \quad B_6 = +\frac{1}{42},$$

$$B_8 = -\frac{1}{30}, \quad B_{10} = +\frac{5}{66}, \quad B_{12} = -\frac{691}{2730}, \dots$$

$$B_3 = B_5 = \dots = B_{2\nu+1} = 0.$$

Formula simbolică de recurenţă

$$(B+1)^\nu = B^\nu \quad \text{unde} \quad B^\nu = B_\nu, \quad \nu = 2, 3, 4 \dots$$

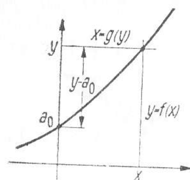
Numerele Euler

$$E_2 = -1, \quad E_4 = +5, \quad E_6 = -61, \quad E_8 = +1385,$$

$$E_{10} = -50521, \quad E_{12} = +2702765, \dots \quad E_1 = E_3 = \dots = E_{2\nu+1} = 0.$$

Numerele Euler satisfac formula de recurenţă:

$$(E+1)^\nu + (E-1)^\nu = 0 \quad \text{unde} \quad E^\nu = E_\nu, \quad \nu = 1, 2, 3, \dots$$



Inversa unei serii de puteri

$$y = f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \frac{f'''(0)}{3!}x^3 + \dots$$

$$= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots$$

$$x = g(y) = \frac{g'(a_0)}{1!}(y - a_0) + \frac{g''(a_0)}{2!}(y - a_0)^2 + \dots$$

$$= b_1(y - a_0) + b_2(y - a_0)^2 + b_3(y - a_0) + \dots$$

Determinarea lui b_ν prin diferenţierea funcţiei inverse:

$$g'(a_0) = \frac{dx}{dy} \qquad \frac{1}{f'} = \frac{1}{a_1} \qquad = b_1 \times 1!;$$

$$g''(a_0) = \frac{d^2x}{dy^2} \qquad -\frac{f''}{f'^3} = -\frac{2a_2}{a_1^3} \qquad = b_2 \times 2!;$$

$$g'''(a_0) = \frac{d^3x}{dy^3} \qquad \frac{3f''^2 - f'f'''}{f'^5} = \frac{12a_2^2 - 6a_1a_3}{a_1^5} \qquad = b_3 \times 3!;$$

$$g''''(a_0) = \frac{d^4x}{dy^4} = \frac{10f'f''f''' - f'^2f'''' - 15f''^3}{f'^7}$$

$$= \frac{120a_1a_2a_3 - 24a_1^2a_4 - 120a_2^3}{a_1^7} \qquad = b_4 \times 4!.$$

Determinarea lui b_ν prin compararea coeficienţilor:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots;$$

$$x = b_1(y - a_0) + b_2(y - a_0)^2 + b_3(y - a_0)^3 + \dots$$

$$x = b_1(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots) + b_2(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots)^2 +$$

$$+ b_3(a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots)^3 + \dots$$

$$x = c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + \dots \qquad c_1 = 1; \qquad c_2 = c_3 = \dots = 0;$$

$$c_1 = b_1a_1;$$

$$c_2 = b_1a_2 + b_2a_1^2;$$

$$c_3 = b_1a_3 + b_2 \times 2a_1a_2 + b_3a_1^3;$$

$$c_4 = b_1a_4 + b_2(2a_1a_3 + a_2^2) + b_3 \times 3a_1^2a_2 + b_4a_1^4;$$

$$c_5 = b_1a_5 + b_2(2a_1a_4 + 2a_2a_3) + b_3(3a_1a_2^2 + 3a_1^2a_3) + b_4 \times 4a_1^3a_2 + b_5a;$$

$$c_6 = b_1a_6 + b_2(2a_1a_5 + 2a_2a_4 + a_3^2) + b_3(3a_1^2a_4 + 6a_1a_2a_3 + a_2^3) + b_4(4a_1^3a_3 + 6a_1^3a_2^2) +$$

$$+ b_5 \times 5a_1^4a_2 + b_2a_1^6.$$

Rezultă: coeficienţii b_ν *ai seriei de puteri a funcţiei inverse:*

$$x = g(y) = b_1(y - a_0) + b_2(y - a_0)^2 + b_3(y - a_0)^3 + \ldots;$$

$$b_1 = \frac{1}{a_1}; \qquad b_2 = \frac{-a_2}{a_1^3}; \qquad b_3 = \frac{-a_1a_3 + 2a_2^2}{a_1^5};$$

$$b_4 = \frac{-a_1^2a_4 + 5a_2(a_1a_3 - a_2^2)}{a_1^7};$$

$$b_5 = \frac{-a_1^3a_5 + 3a_1^2(2a_2a_4 + a_3^2) - 7a_2^3(3a_1a_3 - 2a_2^2)}{a_1^9};$$

$$b_6 = \frac{-a_1^4a_6 + 7a_1^3(a_2a_5 + a_3a_4) - 28a_1^2a_2(a_2a_4 + a_3^2) + 42a_2^3(2a_1a_3 - a_2^2)}{a_1^{11}}.$$

Serii Fourier

Coeficienţii Fourier (formula lui Euler):

$$f(t) = f(t + kT) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\omega t + a_2 \cos 2\omega t + \ldots + a_\nu \cos \nu\omega t +$$

$$+ b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \ldots + b_\nu \sin \nu\omega t + \ldots,$$

$k = 1, 2, 3, \ldots,$

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\,dt, \qquad a_\nu = \frac{2}{T}\int_0^T f(t) \cos \nu\omega t\,dt,$$

$$b_\nu = \frac{2}{T}\int_0^T f(t) \sin \nu\omega t\,dt.$$

Valoarea absolută a amplitudinii armonicii de ordinul ν: $c_\nu = \sqrt{a_\nu^2 + b_\nu^2}$.

Defazajul armonicii de ordinul ν:

φ_ν, cu $a_\nu = c_\nu \sin \varphi_\nu$, $b_\nu = c_\nu \cos \varphi_\nu$.

Procedee de determinare a coeficienţilor a_ν *şi* b_ν*:*

Funcţia analitică: integrala unei funcţii produs se calculează folosind integrarea prin părţi.

Funcţii grafice (oscilograme): cu ajutorul unui analizor de armonice,

Valori echidistante ale funcţiei: metoda de aproximaţie

Tabelul 3.7. **Oscilaţii armonice**

Mărimi caracteristice ale armonicelor		Exemplu: oscilaţie sinusoidală pură
Funcţia:	$f(t) = \frac{c_0}{2} + \sum c_\nu \sin(\nu\omega t + \varphi_\nu)$	$f(t) = H \sin(\omega t + \varphi)$
Perioada:	$T = \frac{2\pi}{\omega}$	$T = \frac{2\pi}{\omega}$
Pulsaţia fundamentalei:	$\omega = \frac{2\pi}{T}$	$\omega = \frac{2\pi}{T}$
Frecvenţa fundamentalei:	$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$	$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T}$
Frecvenţa armonicii de ordinul ν:	$f_\nu = \frac{\nu\omega}{2\pi} = \frac{\nu}{T}$	$f_\nu = 0$
Valoarea medie a funcţiei $f(t)$:	$f_m = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\,dt = \frac{c_0}{2}$	$f_m = 0$
Valoarea medie absolută a funcţiei $f(t)$	$f_a = \frac{1}{T}\int_0^T \lvert f(t)\rvert\,dt$	$f_a = \frac{2}{\pi} H = 0{,}6366\,H$
valoarea medie pătratică a funcţiei $f(t)$:	$f_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2(t)\,dt}$ (valoarea efectivă)	$f_e = \frac{1}{\sqrt{2}} H = 0{,}7071\,H$
Factor de vîrf al funcţiei $f(t)$:	$\sigma_s = \frac{H}{f_e}$ H este valoarea maximă	$\sigma_s = \sqrt{2} = 1{,}4142$
Factor de formă a funcţiei $f(t)$	$\sigma_f = \frac{f_e}{f_a}$	$\sigma_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}1107$

Tabelul 3.8. Funcții periodice

Ecuație și valori caracteristice	Exemplu	Forma curbei	Conținutul de armonice
Funcția exponențială: $e^{-\lambda\omega t}$ $f(t) = \frac{2}{\pi} H^* \sum_{\nu=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\lambda^2+\nu^2}} \sin(\nu\omega t + \varphi_\nu).$ $f_a = \frac{h^*}{\lambda\pi}$ $\lambda = \frac{1}{\pi} \ln \frac{H}{h}$ $f_e = \sqrt{\frac{H^* h^*}{2\pi\lambda}}$ $\operatorname{tg} \varphi_\nu = \frac{\lambda}{\nu}$	$\lambda = 0{,}2206$ $T = 2\pi$ $f_a = 0{,}7213\, H$ $f_e = 0{,}7355\, H$ $\sigma_s = 1{,}3596$ $\sigma_f = 1{,}0197$		$T=2\pi$ $H=2h$
Dreptunghi: $f(t) = \frac{4}{\pi} H \sum_{\nu=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{\nu} \sin \nu\omega (t - t_0)$ $f_a = H$ $\sigma_s = 1$ $f_e = H$ $\sigma_f = 1$			
Triunghi: $f(t) = \frac{8}{\pi^2} H \sum_{\nu=1,3,5}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{\nu-1}{2}}}{\nu^2} \sin \nu\omega (t - t_0)$ $f_a = 0{,}5000\, H$ $\sigma_s = 1{,}7321$ $f_e = 0{,}5774\, H$ $\sigma_f = 1{,}1547$			
Dinte de ferăstrău: $f(t) = \frac{2}{\pi} H \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\nu+1}}{\nu} \sin \nu\omega (t - t_0)$ $f_a = 0{,}5000\, H$ $\sigma_s = 1{,}7321$ $f_e = 0{,}5774\, H$ $\sigma_f = 1{,}1547$			
Trapez: $f(t) = \frac{2HT}{\pi^2 S} \sum_{\nu=1,3,5}^{\infty} \frac{\sin \nu\omega S}{\nu^2} \sin \nu\omega (t - t_0)$ $f_a = H \left[1 - \frac{2S}{T}\right]$ $f_e = H \sqrt{\frac{3T - 8S}{3T}}$	$S = \frac{T}{12}$ $f_a = 0{,}8333\, H$ $f_e = 0{,}8819\, H$ $\sigma_s = 1{,}1339$ $\sigma_f = 1{,}0583$		$S=\frac{T}{12}$

Tabelul 3.9. Funcţii impuls

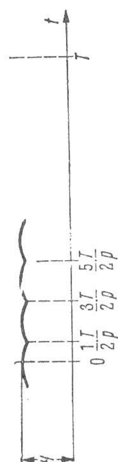
Ecuaţii şi valori caracteristice	Exemplu	Forma curbei	Conţinutul de armonice
Impuls dreptunghiular: $f(t) = \frac{2HS}{T} + \frac{2H}{\pi} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu} \sin \nu\omega S \cos \nu\omega (t - t_0)$ $f_a = \frac{2HS}{T}$ $\quad \sigma_s = \sqrt{\frac{T}{2S}}$ $f_e = H\sqrt{\frac{2S}{T}}$ $\quad \sigma_f = \sqrt{\frac{T}{2S}}$	$f_a = 0{,}1667\,H$ $f_e = 0{,}4082\,H$ $\sigma_s = 2{,}4495$ $\sigma_f = 2{,}4495$		$S = \frac{T}{12}$
Impuls triunghiular: $f(t) = \frac{HS}{T} + \frac{2HT}{S\pi^2} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu^2} \sin^2 \frac{\nu\pi S}{T} \cos \nu\omega (t - t_0).$ $f_a = \frac{HS}{T}$ $\quad \sigma_s = \sqrt{\frac{3T}{2S}}$ $f_e = H\sqrt{\frac{2S}{3T}}$ $\quad \sigma_f = \sqrt{\frac{2T}{3S}}$	$f_a = 0{,}1667\,H$ $f_e = 0{,}3333\,H$ $\sigma_s = 3{,}0000$ $\sigma_f = 2{,}0000$		$S = \frac{T}{6}$
Impuls sinusoidal: $f(t) = \frac{H}{\pi K} + \frac{2HK}{\pi} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{\nu\pi}{2K}}{K^2 - \nu^2} \cos \nu\omega (t - t_0)$ $f_a = \frac{H}{\pi K}$ $\quad \sigma_s = 2\sqrt{K}$ $f_e = \frac{H}{2\sqrt{K}}$ $\quad \sigma_f = \frac{\pi}{2}\sqrt{K}$	$f_a = 0{,}1061\,H$ $f_e = 0{,}2887\,H$ $\sigma_s = 3{,}4641$ $\sigma_f = 2{,}7207$		$K = 3$
Undă dreptunghiulară: $f(') = \frac{4H}{\pi} \sum_{\nu=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{\nu} \cos \nu\omega S \sin \nu\omega (t - t_0)$ $f_a = \left[-1 \frac{4S}{T}\right] H$ $\quad f_e = H\sqrt{1 - \frac{4S}{T}}$	$f_a = 0{,}6667\,H$ $f_c = 0{,}8165\,H$ $\sigma_s = 1{,}2247$ $\sigma_f = 1{,}2247$		$S = \frac{T}{12}$
Undă trapezoidală: $(t) = \frac{2HT}{S\pi^2} \sum_{\nu=1,3,5}^{\infty} \frac{\sin \nu\omega (t - t_0)}{\nu^2} (\sin \nu\omega S_1 - \sin \nu\omega S_2)$ $f_a = H\left[1 - 2\frac{S_2 + S_2}{T}\right], f_e = H\sqrt{1 - 4\frac{S_2 + 2S_1}{3T}}$	$f_a = 0{,}5000\,H$ $f_e = 0{,}6667\,H$ $\sigma_s = 1{,}5000$ $\sigma_f = 1{,}3333$		$S = S_2 = \frac{T}{12}$ $S_1 = \frac{T}{6}$

Tabelul 3.10. Funcţii de redresare

Forma şi ecuaţia curbelor	Valorile caracteristice şi conţinutul de armonice
Monoalternanţă: $f(t) = \frac{H}{\pi} + \frac{H}{2}\cos\omega t - \frac{2H}{\pi} \times \sum_{\nu=2,4,6}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{\nu}{2}}}{\nu^2 - 1}\cos\nu\omega t$	$f_a = 0{,}3183\ H$; $f_e = 0{,}5000\ H$; $\sigma_s = 2{,}0000$; $\sigma_f = 1{,}5708$
Dublă alternanţă: $f(t) = \frac{2H}{\pi} - \frac{4H}{\pi}\sum_{\nu=2,4,6}^{\infty}{}' \frac{(-1)^{\frac{\nu}{2}}}{\nu^2 = 1}\cos\nu\omega t$	$f_a = 0{,}6366\ H$; $f_e = 0{,}7071\ H$; $\sigma_s = 1{,}4142$; $\sigma_f = 1{,}1107$
Trei faze: $f(t) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}H - \frac{3\sqrt{3}}{\pi}H\sum_{\nu=3,6,9}^{\infty}\frac{(-1)^{\nu}}{\nu^2 - 1}\cos\nu\omega t$	$f_a = 0{,}8270\ H$; $f_e = 0{,}8407\ H$; $\sigma_s = 1{,}1895$; $\sigma_f = 1{,}0165$
Şase faze: $f(t) = \frac{3}{\pi}H - \frac{6}{\pi}H\sum_{\nu=6,12,18}^{\infty}\frac{(-1)^{\frac{\nu}{2}}}{\nu^2 - 1}\cos\nu\omega t$	$f_a = 0{,}9549\ H$; $f_e = 0{,}9558\ H$; $\sigma_s = 1{,}0463$; $\sigma_f = 1{,}0009$

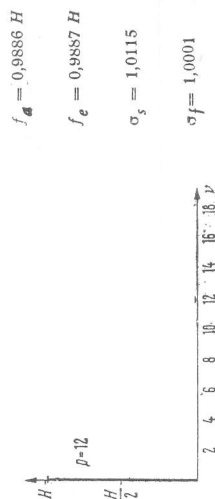
Tabelul 3.10 (continuare)

Forma şi ecuaţia curbelor	Valorile caracteristice şi conţinutul de armonice
p-faze:	



$$f(t) = \frac{2}{\pi} Hp \sin\frac{\pi}{p}\left[\frac{1}{2} - \sum_{x=1}^{\infty}\frac{(-1)^x}{(xp)^2-1}\cos x\, p\omega t\right]$$

$$f_a = \frac{H_p}{\pi}\sin\frac{\pi}{p}, \quad f_e = H\sqrt{\frac{1}{2}+\frac{p}{4\pi}\sin\frac{2\pi}{p}}$$



$f_a = 0{,}9886\, H$

$f_e = 0{,}9887\, H$

$\sigma_s = 1{,}0115$

$\sigma_f = 1{,}0001$

3.1.3. Determinanţi

Sistem de ecuaţii liniare cu două necunoscute

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = b_1, \qquad D = \begin{vmatrix} a_{11} a_{12} \\ a_{21} a_{22} \end{vmatrix}$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = b_2.$$

Soluţii

$$x_1 = \frac{b_1a_{22} - a_{12}b_2}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} = \frac{D_1}{D}, \qquad D_1 = \begin{vmatrix} b_1 a_{12} \\ b_2 a_{22} \end{vmatrix}$$

$$x_2 = \frac{a_{11}b_2 - b_1a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} = \frac{D_2}{D}. \qquad D_2 = \begin{vmatrix} a_{11} b_1 \\ a_{21} b_2 \end{vmatrix}$$

Sistem de ecuaţii liniare cu trei necunoscute:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = b_1,$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = b_2,$$

$$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = b_3.$$

Soluţii:

$$x_1 = \frac{b_1(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - b_2(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + b_3(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22})}{a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - a_{12}(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31}) + a_{13}(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31})} = \frac{D_1}{D},$$

$$x_2 = -\frac{b_1(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31}) - b_2(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) + b_3(a_{11}a_{23} - a_{13}a_{21})}{a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - a_{12}(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31}) + a_{13}(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31})} = \frac{D_2}{D},$$

$$x_3 = \frac{b_1(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31}) - b_2(a_{11}a_{32} - a_{12}a_{31}) + b_3(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})}{a_{11}(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32}) - a_{12}(a_{21}a_{33} - a_{23}a_{31}) + a_{13}(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31})} = \frac{D_3}{D},$$

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad D_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad D_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} \end{vmatrix}, \quad D_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix}.$$

Determinanţi de ordinul doi:

$$\begin{vmatrix} a_{11}a_{12} \\ a_{21}a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21},$$

a_{11} ╲ ⋰ a_{12} ——— +

a_{21} ⋰ ╲ a_{22} - - - - - −

Determinanți de ordinul trei:

$$\begin{vmatrix} a_{11}a_{12}a_{13} \\ a_{21}a_{22}a_{23} \\ a_{31}a_{32}a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}\begin{vmatrix} a_{22}a_{23} \\ a_{32}a_{33} \end{vmatrix} - a_{12}\begin{vmatrix} a_{21}a_{23} \\ a_{31}a_{33} \end{vmatrix} + a_{13}\begin{vmatrix} a_{21}a_{22} \\ a_{31}a_{32} \end{vmatrix}.$$

Determinanți de ordinul n:

$$\begin{vmatrix} a_{11}a_{12}a_{13} \cdots a_{1n} \\ a_{21}a_{22}a_{23} \cdots a_{2n} \\ a_{31}a_{32}a_{33} \cdots a_{3n} \\ \vdots \qquad\qquad \vdots \\ a_{n1}a_{n2}a_{n3} \cdots a_{nn} \end{vmatrix} = |a_{ij}|$$

prin dezvoltarea determinantului după o linie sau coloană se pot obține determinanți de ordinul $(n - 1)$.

a_{ij} = element al determinantului aflat în

coloana j (vertical) și

linia i (orizontal)

Reguli de calcul pentru determinanți de ordinul n

Valoarea lui D nu se modifică dacă se schimbă între ele liniile cu coloanele

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{vmatrix}$$

D își schimbă semnul dacă se schimbă între ele două linii (sau două coloane)

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{11} & a_{12} \end{vmatrix}$$

Dacă se înmulțesc elementele unei linii (coloane) cu același factor λ, atunci D se va transforma în λD

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ \lambda a_{21} & \lambda a_{22} \end{vmatrix} = \lambda\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$$

Dacă toate elementele unui determinant de ordinul n se înmulțesc cu același factor λ, atunci D se transformă în $\lambda^n D$ (o matrice **D** se transformă în acest caz numai în λ**D**)

$$\begin{vmatrix} \lambda a_{11} & \lambda a_{12} \\ \lambda a_{21} & \lambda a_{22} \end{vmatrix} = \lambda^2\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$$

Dacă elementele unei linii (unei coloane) sînt proporționale cu elementele unei alte linii (unei alte coloane) atunci $D = 0$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ \lambda a_{11} & \lambda a_{12} \end{vmatrix} = 0$$

Valoarea lui D nu se modifică dacă elementele unei linii (unei coloane) înmulțite cu același factor λ se adună cu elementele unei alte linii (unei alte coloane)

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} + \lambda a_{12} & a_{12} \\ a_{21} + \lambda a_{22} & a_{22} \end{vmatrix}$$

Dacă elementele unei linii (unei coloane) sînt sume de doi termeni, atunci D se poate descompune într-o sumă de doi determinanți

$$\begin{vmatrix} \alpha_1 + \beta_1 & \alpha_2 + \beta_2 & \alpha_3 + \beta_3 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & v_{33} \end{vmatrix}$$

Dezvoltarea după o linie:

$$\begin{vmatrix} a_{11}\,a_{12} \ldots a_{1n} \\ a_{21}\,a_{22} \ldots a_{2n} \\ \vdots \quad \vdots \qquad \vdots \\ a_{n1}a_{n2} \ldots a_{nn} \end{vmatrix} \qquad \begin{array}{ll} D = a_{11}A_{11} + a_{12}A_{12} + \ldots + a_{1n}A_{1n} & \text{(după prima linie)} \\ D = a_{21}A_{21} + a_{22}A_{22} + \ldots + a_{2n}A_{2n} & \text{(după a doua linie)} \\ \qquad \vdots \qquad\qquad\qquad \vdots & \\ D = a_{n1}A_{n1} + a_{n2}A_{n2} + \ldots + a_{nn}A_{nn} & \text{(după linia } n) \end{array}$$

Dezvoltarea după o coloană

$$\begin{vmatrix} a_{11}\,a_{12} \ldots a_{1n} \\ a_{21}\,a_{22} \ldots a_{2n} \\ \vdots \quad \vdots \qquad \vdots \\ a_{n1}a_{n2} \ldots a_{nn} \end{vmatrix} \qquad \begin{array}{ll} D = a_{11}A_{11} + a_{21}A_{21} + \ldots + a_{n1}A_{n2} & \text{(după prima coloană)} \\ D = a_{12}A_{12} + a_{22}A_{22} + \ldots + a_{n2}A_{n2} & \text{(după a doua coloană)} \\ \qquad \vdots \qquad\qquad\qquad \vdots & \qquad \vdots \\ D = a_{1n}A_{1n} + a_{2n}A_{2n} + \ldots + a_{nn}A_{nn} & \text{(după coloana } n) \end{array}$$

$$A_{ij} = (-1)^{i+j}\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \ldots a_{1,\ j-1} & a_{1j} & a_{1,\ j+1} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \ldots a_{2,\ j-1} & a_{2j} & a_{2,\ j+1} & \ldots a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \ldots a_{3,\ j-1} & a_{3j} & a_{3,\ j+1} & \ldots a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ a_{i-1,\ 1} & a_{i-1,\ 2} & a_{i-1,\ 3} & \ldots a_{i-1,\ j-1} & a_{i-1,\ j} & a_{i-1,\ j+1} & \ldots a_{i-1,\ n} \\ \hline a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & \ldots a_{i,\ j-1} & a_{ij} & a_{i,\ j+1} & \ldots a_{in} \\ \hline a_{i+1,\ 1} & a_{i+1,2} & a_{i+1,3} & \ldots a_{i+1,\ j-1} & a_{i+1,\ j} & a_{i+1,\ j+1} & \ldots a_{i+1,\ n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \ldots a_{n,\ j-1} & a_{nj} & a_{n,\ j+1} & \ldots a_{nn} \end{vmatrix}$$

A_{ij} este determinantul de ordinul $(n-1)$ (fără linia i şi coloana j) — complementul algebric al elementului a_{ij}

$$\begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & 0 & 0 \\ a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = a_{11} a_{22} \begin{vmatrix} a_{33} & 0 \\ a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} = a_{11} a_{22} a_{33} a_{44}$$

Un sistem de ecuaţii liniare omogene

$$\begin{aligned} a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n &= 0 \\ a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n &= 0 \\ \vdots \qquad \vdots \qquad\quad \vdots \\ a_{n1} x_1 + a_{n2} x_2 + \dots + a_{nn} x_n &= 0 \end{aligned}$$

are o soluţie diferită de zero dacă

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & & a_{nn} \end{vmatrix} = 0$$

Dacă, de exemplu, în sistemul

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &= 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &= 0 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 &= 0 \end{aligned}$$

determinantul

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = 0 \text{ şi } x_1 \neq 0,$$

atunci din ecuaţiile

$$\begin{aligned} a_{22} \frac{x_2}{x_1} + a_{23} \frac{x_3}{x_1} &= -a_{21} \\ a_{32} \frac{x_2}{x_1} + a_{33} \frac{x_3}{x_1} &= -a_{31} \end{aligned}$$

se pot calcula rapoarturile x_2/x_1 şi x_3/x_1 dacă

$$A_{11} = \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} \neq 0,$$

şi anume

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{-\begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}}, \qquad \frac{x_3}{x_1} = \frac{\begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}}.$$

Dacă se introduc valori arbitrare $x_1 \neq 0$, atunci pentru fiecare valoare se obţin valori corespunzătoare pentru x_2 şi x_3.

3.1.4. Matrice

$m \times n$ numere, aranjate într-un tablou dreptunghiular de m linii şi n coloane

$$A = (a_{ij})_{m,n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

a_{ij} = element al matricei, situat în coloana j şi în linia i

formează o matrice.

Egalitatea matricelor:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2n} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & \dots & b_{3n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & b_{m3} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix}$$

dacă pentru orice i şi j

$$a_{ij} = b_{ij}$$

Suma matricelor:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} & \dots & a_{1n} + b_{1n} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} & \dots & a_{2n} + b_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} + b_{m1} & a_{m2} + b_{m2} & \dots & a_{mn} + b_{mn} \end{pmatrix}$$

Reguli de calcul

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A}; \qquad \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = (\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C}.$$

Multiplicarea cu un număr λ:

$$\lambda A = \lambda \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda a_{11} & \lambda a_{12} & \dots & \lambda a_{1n} \\ \lambda a_{21} & \lambda a_{22} & \dots & \lambda a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \lambda a_{m1} & \lambda a_{m2} & \dots & \lambda a_{mn} \end{pmatrix}$$

(la determinanți se înmulțește cu λ numai o linie sau o coloană)

$$\lambda(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = \lambda\mathbf{A} + \lambda\mathbf{B}.$$

Înmulțirea matricelor

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1p} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2p} \\ \vdots & & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{np} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2p} \\ \vdots & & & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mp} \end{pmatrix},$$

unde:

$$\begin{aligned} c_{11} &= a_{11} b_{11} + a_{12} b_{21} + \dots + a_{1n} b_{n1} \\ c_{12} &= a_{11} b_{12} + a_{12} b_{22} + \dots + a_{1n} b_{n2} \\ &\vdots \\ c_{1p} &= a_{11} b_{1p} + a_{12} b_{2p} + \dots + a_{1n} b_{np} \\ &\vdots \\ c_{ij} &= a_{i1} b_{1j} + a_{i2} b_{2j} + \dots + a_{in} b_{nj} \\ &\vdots \\ c_{m1} &= a_{m1} b_{11} + a_{m2} b_{21} + \dots + a_{mn} b_{n1} \\ c_{m2} &= a_{m1} b_{12} + a_{m2} b_{22} + \dots + a_{mn} b_{n2} \\ &\vdots \\ c_{mp} &= a_{m1} b_{1p} + a_{m2} b_{2p} + \dots + a_{mn} b_{np} \end{aligned}$$

Schema de înmulțire

$$\mathbf{C} = \mathbf{AB} \qquad c_{ij} = \sum_{\nu=1}^{n} a_{i\nu} b_{\nu j}$$

$$\begin{array}{cccc|cccc} & & & & b_{11} & b_{12} \dots & \boxed{b_{1j}} & \dots b_{1p} \\ & & & & b_{21} & b_{22} \dots & b_{2j} & \dots b_{2p} \\ & & & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ & & & & b_{n1} & b_{n2} \dots & b_{nj} & \dots b_{np} \\ \hline a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & c_{11} & c_{12} \dots & c_{1j} & \dots c_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & c_{21} & c_{22} \dots & c_{2j} & \dots c_{2p} \\ \vdots & & & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \boxed{a_{i1}} & a_{i2} & \dots & a_{in} & c_{i1} & c_{i2} \dots & \boxed{c_{ij}} & \dots c_{ip} \\ \vdots & & & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} & c_{m1} & c_{m2} \dots & c_{mj} & \dots c_{mp} \end{array}$$

Prima matrice trebuie să aibă tot atîtea coloane cîte linii are a doua matrice, în caz contrar nu s-ar putea defini produsul.

$$\mathbf{A}(\mathbf{BC}) = (\mathbf{AB})\,\mathbf{C}; \quad \mathbf{A}(\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{AB} + \mathbf{AC};$$

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B})\,\mathbf{C} = \mathbf{AC} + \mathbf{BC}.$$

În general, $\mathbf{AB} \neq \mathbf{BA}$. În cazul excepțional cînd $\mathbf{AB} = \mathbf{BA}$ (produs comutativ), A și B se numesc matrice permutabile.

Dacă $\mathbf{z} = \mathbf{Ay}$, $\mathbf{y} = \mathbf{Bx}$, atunci vom avea $\mathbf{z} = \mathbf{ABx}$ (unde **x**, **y** și **z** sînt vectori),

Matricea inversă $\mathbf{A}^{-1}$:

$$\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{E} \quad \text{(matricea unitate).}$$

$$(\mathbf{AB})^{-1} = \mathbf{B}^{-1}\,\mathbf{A}^{-1}$$

Matricea $\mathbf{A}'$ transpusă: dacă în **A** se schimbă liniile și coloanele între ele atunci noua matrice se numește matrice transpusă a lui **A**

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{m2} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \qquad (\mathbf{AB})' = \mathbf{B}'\mathbf{A}'.$$

Exemple de calcul folosind matricea

Legea lui Ohm

Într-o porțiune de circuit: $u = Ri$ (u — tensiune; i — curent: R — rezistență)
Rețea din n conductoare:

Mod de scriere a componentelor	Mod de scriere matriceală
$u_1 = r_{11} i_1 + r_{12} i_2 + t_{13} i_3 + \dots + r_{1n} i_n$	$\mathbf{u} = \mathbf{Zi}$
$u_2 = r_{21} i_1 + r_{22} i_2 + r_{23} i_3 + \dots + r_{2n} i_n$	**u** — matrice tensiune (vector)
$u_3 = r_{31} i_1 + r_{32} i_2 + r_{33} i_3 + \dots + r_{3n} i_n$	**i** — matrice curent (vector)
$\vdots$	**Z** — matrice impedanță
$u_n = r_{n1} i_1 + r_{n2} i_2 + r_{n3} i_3 + \dots + r_{nn} i_n$	

$$z_{\nu\nu} = R_\nu + j\omega L_\nu + \frac{1}{j\omega C_\nu}; \quad z_{\nu\mu} = j\omega L_{\nu\mu} \quad (\nu \neq \mu)$$

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} \qquad \mathbf{i} = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_n \end{pmatrix} \qquad \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & \dots & z_{2n} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & \dots & z_{3n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & z_{n3} & \dots & z_{nn} \end{pmatrix}$$

Ecuaţii liniare

O ecuaţie cu o necunoscută:

$$ax = b. \qquad \text{Soluţia: } x = a^{-1}\, b \qquad a^{-1} = \frac{1}{a}.$$

Cazul a n ecuaţii cu n necunoscute:

Modul de scriere a componentelor

$$\begin{aligned} a_{11}\, x_1 + a_{12}\, x_2 + a_{13}\, x_3 + \dots + a_{1n}\, x_n &= b_1 \\ a_{21}\, x_1 + a_{22}\, x_2 + a_{23}\, x_3 + \dots + a_{2n}\, x_n &= b_2 \\ a_{31}\, x_1 + a_{32}\, x_2 + a_{33}\, x_3 + \dots + a_{3n}\, x_n &= b_3 \\ \vdots \qquad\qquad & \ \ \vdots \\ a_{n1}\, x_1 + a_{n2}\, x_2 + a_{n3}\, x_3 + \dots + a_{nn}\, x_n &= b_n \end{aligned}$$

Notarea matricelor

$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$

A matricea sistemului de ecuaţii
x matricea soluţiilor (vector)
b matricea (vector) termenilor liberi

Soluţia:

Modul de scriere a componentelor

$$\begin{aligned} x_1 &= \alpha_{11}\, b_1 + \alpha_{12}\, b_2 + \alpha_{13}\, b_3 + \dots + \alpha_{1n}\, b_n \\ x_2 &= \alpha_{21}\, b_1 + \alpha_{22}\, b_2 + \alpha_{23}\, b_3 + \dots + \alpha_{2n}\, b_n \\ x_3 &= \alpha_{31}\, b_1 + \alpha_{32}\, b_2 + \alpha_{33}\, b_3 + \dots + \alpha_{3n}\, b_n \\ &\vdots \\ x_n &= \alpha_{n1}\, b_1 + \alpha_{n2}\, b_2 + \alpha_{n3}\, b_3 + \dots + \alpha_{nn}\, b_n \end{aligned}$$

Modul de scriere matriceală

$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$ ($\mathbf{A}^{-1}$ este matricea inversă a lui **A**)

$$x_i = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1,i-1} & b_1 & a_{1,i+1} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2,i-1} & b_2 & a_{2,i+1} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{n,i-1} & b_n & a_{n,i+1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1,i-1} & a_{1,i} & a_{1,i+1} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2,i-1} & a_{2,i} & a_{2,i+1} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & & & & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{n,i-1} & a_{n,i} & a_{n,i+1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}}$$

$\alpha_{ij} =$ (diagram: b_j)

Ecuaţia caracteristică

Exemplu: rezolvarea unui sistem de ecuaţii diferenţiale de ordinul I

Modul de scriere a componentelor

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_{11}\, x_1 + a_{12}\, x_2 + a_{13}\, x_3 + \dots + a_{1n}\, x_n \\ \dot{x}_2 &= a_{21}\, x_1 + a_{22}\, x_2 + a_{23}\, x_3 + \dots + a_{2n}\, x_n \\ \dot{x}_3 &= a_{31}\, x_1 + a_{32}\, x_2 + a_{33}\, x_3 + \dots + a_{3n}\, x_n \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= a_{n1}\, x_1 + a_{n2}\, x_2 + a_{n3}\, x_3 + \dots + a_{nn}\, x_n \end{aligned}$$

Modul de scriere matriceală

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax}$$

Înlocuind $x_1 = e^{\lambda t} b_1$, $x_2 = e^{\lambda t} b_2$, ..., $x_n = e^{\lambda t} b_n$ se obţine $\mathbf{x} = e^{\lambda t}\mathbf{b}$

$$\begin{aligned} (a_{11} - \lambda)\, b_1 + a_{12}\, b_2 + a_{13}\, b_3 + \dots + a_{1n}\, b_n &= 0 \\ a_{21}\, b_1 + (a_{22} - \lambda)\, b_2 + a_{23}\, b_3 + \dots + a_{2n}\, b_n &= 0 \\ a_{31}\, b_1 + a_{32}\, b_2 + (a_{33} - \lambda)\, b_3 + \dots + a_{3n}\, b_n &= 0 \\ \vdots \qquad\qquad & \ \ \vdots \\ a_{n1}\, b_1 + a_{n2}\, b_2 + a_{n3}\, b_3 + \dots + (a_{nn} - \lambda)\, b_n &= 0 \\ (\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E})\, \mathbf{b} &= 0 \end{aligned}$$

$$A - \lambda E = \begin{pmatrix} a_{11}-\lambda & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22}-\lambda & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn}-\lambda \end{pmatrix}$$ matricea caracteristică

$$0 = |A - \lambda E| = \begin{vmatrix} a_{11}-\lambda & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22}-\lambda & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn}-\lambda \end{vmatrix}$$ ecuaţie caracteristică

Ecuaţia caracteristică este un polinom de gradul n.

Valorile proprii λ ale unei matrice **A** sînt rădăcinile λ ale polinomului lor caracteristic $|\mathbf{A} - \lambda \mathbf{E}| = 0 \times \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}$, care are soluţia $\mathbf{x} = c_1 e^{\lambda_1 t}\mathbf{b}_1 + \dots + c_n e^{\lambda_n t}\mathbf{b}_n$, cu constante de integrare arbitrare $c_1, c_2 \dots c_n$; în acest caz $(\mathbf{A} - \lambda_v \mathbf{E})\mathbf{b}_v = 0$.

3.1.5. Metode numerice de aproximaţie

Rezolvarea ecuaţiilor diferenţiale de ordinul 1:

$$y' = f(x, y); \qquad y = y_0 + \int_{x_0}^{x} f(x, y)\, dx.$$

Metoda de integrare de ordinul întîi Euler-Cauchy

Dezvoltarea în serie

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{h^2}{2} y''(x) + \dots \qquad \boxed{y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n).}$$

Se va folosi numai pentru o primă orientare asupra modului de rezolvare în imediata apropiere a lui $P_0(x_0, y_0)$. Eroarea metodei de aproximaţie este în raport direct cu pătratul mărimii treptei h.

Metoda trapezului înscris

Eliminarea lui $y''(x)$ din seriile

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{h^2}{2} y''(x)$$

$$y'(x+h) = y'(x) + hy''(x) \qquad \text{duce la}$$

$$\boxed{y_{n+1} = y_n + \frac{1}{2} h \left(f(x_n, y_n) + f[x_n + h, y_n + h \cdot f(x_n, y_n)] \right)}$$

Metoda trapezului circumscris

Eliminarea lui $y''(x)$ din seriile

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{1}{2} h^2 y''(x).$$

$$y'\left(x + \frac{1}{2} h\right) = y'(x) + \frac{1}{2} hy''(x) \qquad \text{duce la}$$

$$\boxed{y_{n+1} = y_n + hf\left[x_n + \frac{1}{2} h,\ y_n + \frac{1}{2} hf(x_n, y_n)\right]}$$

Metoda de integrare de ordinul trei a lui Simpson

Eliminarea lui $y''(x)$ şi $y'''(x)$ din seriile

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{1}{2} h^2 y''(x) + \frac{1}{6} h^3 y'''(x) + \dots$$

$$y'\left(x + \frac{1}{2} h\right) = y'(x) + \frac{1}{2} hy''(x) + \frac{1}{8} h^2 y'''(x)$$

$$y'(x+h) = y'(x) + hy''(x) + \frac{1}{2} h^2 y'''(x) \qquad \text{duce la}$$

$$\boxed{\begin{gathered} y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6} h \left(f(x_n, y_n) + 4f\left[x_n + \frac{1}{2} h,\ y_n + \frac{1}{2} hf(x_n, y_n)\right] + f(h) \right) \\ f(h) = f[x_n + h,\ y_n + hf(x_n, y_n)] \end{gathered}}$$

Metoda de integrare de ordinul patru Runge-Kutta

$$k_1 = hf(x_n, y_n), \qquad k_3 = hf\left(x_n + \frac{1}{2} h,\ y_n + \frac{1}{2} k_2\right),$$

$$k_2 = hf\left(x_n + \frac{1}{2} h,\ y_n + \frac{1}{2} k_1\right), \qquad k_4 = hf(x_n + h,\ y_n + k_3)$$

$$\boxed{y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)_{n+1}.}$$

Rezolvarea ecuaţiilor diferenţiale de ordinul 2 $y'' = f(x, y, y')$

Metoda de integrare de ordinul doi Euler-Cauchy

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{1}{2}h^2 y''(x), \quad y'(x+h) = y'(x) + hy''(x),$$

$$\boxed{\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n + hy'_n + \frac{1}{2}h^2 f(x_n, y_n, y'_n), \\ y'_{n+1} &= y'_n + hf(x_n, y_n, y'_n). \end{aligned}}$$

Această metodă se recomandă atunci cînd este vorba de o primă orientare asupra modului de rezolvare şi cînd ecuaţia diferenţială este dată de forma

$$y'' + f_1(x, y)\,y' + f_2(x, y) = F(x).$$

Schema de aproximare duce la formulele de recurenţă

$$y_{n+1} = y_n + h\left[1 - \frac{1}{2}h^2 f_1(x_n, y_n)\right]y'_n + \frac{1}{2}h^2[F(x_n) - f_2(x_n, y_n)],$$

$$y'_{n+1} = y'_n[1 - hf_1(x_n, y_n)] + h[F(x_n) - f_2(x_n, y_n)].$$

Metoda de integrare de ordinul trei a lui Encke

$$\begin{aligned} y(x+h) &= y(x) + hy'(x) + \frac{1}{2}h^2 y''(x) \\ y(x-h) &= y(x) - hy'(x) + \frac{1}{2}h^2 y''(x) \quad + \\ \hline y(x+h) &= -y(x-h) + 2y(x) + h^2 y''(x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y'(x+h) &= y'(x) + hy''(x) + \frac{1}{2}h^2 y'''(x) \\ y'(x-h) &= y'(x) - hy''(x) + \frac{1}{2}h^2 y'''(x) \quad - \\ \hline y'(x+h) &= +y'(x-h) + 2hy''(x). \end{aligned}$$

De aici rezultă schema de aproximare

$$\boxed{\begin{aligned} y_{n+1} &= 2y_n - y_{n-1} + h^2 f(x_n, y_n, y'_n \\ y'_{n+1} &= y'_{n-1} + 2hf(x_n, y_n, y'_n). \end{aligned}}$$

Pentru stabilirea valorilor y_1 şi y' (calcul preliminar) se va folosi metoda Euler-Cauchy.

Metoda de integrare de ordinul patru Runge-Kutta

$$y''_{\rm I} = y''_n = f(x_n, y_n, y'_n),$$

$$y''_{\rm II} = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}y'_n + \frac{h^2}{8}y''_{\rm I}, y'_n + \frac{h}{2}y''_{\rm I}\right),$$

$$y''_{\rm III} = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}y'_n + \frac{h^2}{8}y''_{\rm I}, y'_n + \frac{h}{2}y''_{\rm II}\right),$$

$$y''_{\rm IV} = f\left(x_n + h, y_n + hy'_n + \frac{h^2}{2}y''_{\rm III}, y'_n + hy''_{\rm III}\right).$$

$$Y''_{\rm II} = y''_{\rm II} + y''_{\rm III} + y''_{\rm IV},$$

$$Y''_{\rm I} = y''_{\rm I} + y''_{\rm II} + y''_{\rm III}.$$

$$\boxed{\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n + hy'_n + \frac{1}{6}h^2 Y''_{\rm I} \\ y'_{n+1} &= y'_n + \frac{1}{6}h[Y''_{\rm I} + Y''_{\rm II}] \end{aligned}}$$

Metoda de integrare de ordinul patru a lui Blaess

Corectarea metodei lui Euler-Cauchy la fiecare cinci paşi

pentru $n = 0,$	1,	2,	3,	4,	$n \neq 5$
V,	6,	7,	8,	9,	10
X,	11,	12,	13,	14,	15
...					...

este valabil

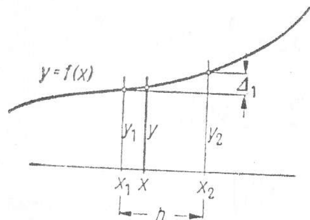
$$\boxed{\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n + hy'_n + \frac{h^2}{2}f(x_n, y_n, y'_n), \\ y'_{n+1} &= y'_n + hf(x_n, y_n, y'_n). \end{aligned}}$$

Corecţia: pentru $K = $ V, X, XV, ... $n = 5, 10, 15, \ldots$ este valabil

$$\boxed{\begin{aligned} y'_K &= y'_n + h\left(\frac{11}{24}y''_n + \frac{5}{24}y''_{n-4} - \frac{16}{24}y''_{n-5}\right), \\ y_K &= y_n + \frac{h^2}{2}\left(\frac{45}{24}y''_{n-1} + \frac{100}{24}y''_{n-4} - \frac{145}{24}y''_{n-5}\right). \end{aligned}}$$

Interpolarea numerică a valorilor funcţiilor

Interpolarea liniară:

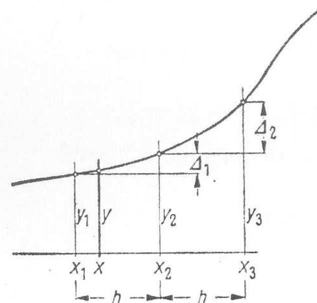


$$y = y_1 + (x - x_1)\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1},$$

$$\xi = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \qquad 0 < \xi < +1,$$

$$h = x_2 - x_1, \qquad \Delta_1 = y_2 - y_1, \qquad \boxed{y = y_1 + \xi\Delta_1.}$$

Interpolarea pătratică:



$$y = y_1 + A_1(x - x_1) + A_2(x - x_1)^2,$$

$$\xi = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \qquad 0 < \xi < +2,$$

$$\Delta_1 = y_2 - y_1, \qquad \Delta_2 = y_3 - y_2,$$

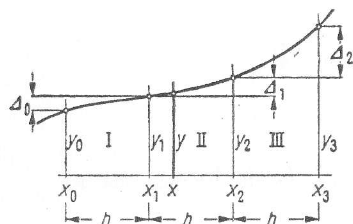
$$h = x_3 - x_2 = x_2 - x_1$$

pe cît posibil, numai pentru

$$0{,}5 < \xi < 1{,}5$$

$$\boxed{y = y_1 + \frac{\xi}{2}(3 - \xi)\,\Delta_1 - \frac{\xi}{2}(1 - \xi)\,\Delta_2.}$$

Interpolarea cubică:



$$y = y_1 + A_1(x - x_1) + A_2(x - x_1)^2 + A_3(x - x_1)^3,$$

$$\xi = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \qquad -1 < \xi < +2,$$

$$\Delta_0 = y_1 - y_0, \qquad \Delta_1 = y_2 - y_1,$$

$$\Delta_2 = y_3 - y_2,$$

$$h = x_3 - x_2 = x_2 - x_1 = x_1 - x_0.$$

Domeniul II se va folosi la interpolare normală

$$0 < \xi < 1 \qquad f_0(\xi) = \frac{\xi}{6}(\xi^2 - 3\xi + 2).$$

Domeniul I se va folosi numai la capătul din stînga al figurii de la p. 166 jos

$$-1 < \xi < 0 \qquad f_1(\xi) = \frac{\xi}{6}(2\xi^2 - 3\xi - 5).$$

Domeniul III se va folosi numai la capătul din dreapta al figurii de la p. 166 jos

$$1 < \xi < 2 \qquad f_2(\xi) = \frac{\xi}{6}(\xi^2 - 1).$$

$$\boxed{y = y_1 + f_0(\xi)\Delta_0 - f_1(\xi)\Delta_1 + f_2(\xi)\,\Delta_2.}$$

Metoda integrării

Se dă

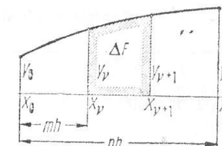
$$x_{\nu+1} - x_\nu = h, \qquad 0 \leqslant m \leqslant n - 1.$$

Regula trapezului (aproximare liniară)

Aria elementului de suprafaţă

$$\Delta F = \frac{h}{2}(y_\nu + y_{\nu+1}).$$

$$\boxed{F = h\left(\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + \ldots + y_{n-1} + \frac{y_n}{2}\right)}$$

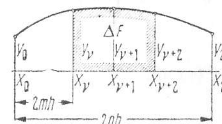


Regula Simpson (aproximare pătratică)

Aria elementului de suprafaţă

$$\Delta F = \frac{h}{3}(y_\nu + 4y_{\nu+1} + y_{\nu+2}).$$

$$\boxed{\begin{aligned} F = \frac{h}{3}[y_0 &+ 2(y_2 + y_4 + y_6 + \ldots + y_{2n-2}) \\ &+ 4(y_1 + y_3 + y_5 + \ldots + y_{2n-1}) + y_{2n}] \end{aligned}}$$

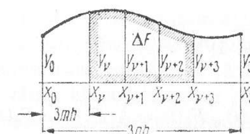


Aproximarea cubică a funcţiei

Aria elementului de suprafaţă

$$\Delta F = \frac{3}{8}h(y_\nu + 3y_{\nu+1} + 3y_{\nu+2} + y_{\nu+3}).$$

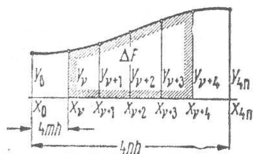
$$\boxed{\begin{aligned} F = \frac{3}{8}h[y_0 &+ 3(y_1 + y_4 + y_7 + \ldots + y_{3n-5} + y_{3n-2}) \\ &+ 3(y_2 + y_5 + y_8 + \ldots + y_{3n-4} + y_{3n-1}) \\ &+ 2(y_3 + y_6 + y_9 + \ldots + y_{3n-3}) + y_{3n}] \end{aligned}}$$



Aproximarea bipătratică a funcţiei

Aria elementului de suprafaţă

$$\Delta F = \frac{4h}{90}\,(7y_\nu + 32y_{\nu+1} + 12y_{\nu+2} + 32y_{\nu+3} + 7y_{\nu+4}).$$



$$F = \frac{2h}{45}\,[7y_0 + 32(y_1 + y_3 + y_5 + \ldots + y_{4n-1}) + 12(y_2 + y_6 + y_{10} + \ldots + y_{4n-2}) + 14(y_4 + y_8 + y_{12} + \ldots + y_{4n-4}) + 7y_{4n}]$$

3.1.6. Transformarea Laplace

Funcţia originală $F(t)$	Funcţia imagine $\varphi(p) = L[F(t)]$
$F_1(t) + F_2(t)$	$\varphi_1(p) + \varphi_2(p)$ (regulă de adunare)
$F(at - b)$	$\frac{1}{a}\,e^{-\frac{b}{a}p}\,\varphi\left(\frac{p}{a}\right)$
$\frac{1}{a}\,e^{-\frac{b}{a}t}\,F\left(\frac{t}{a}\right)$	$\varphi(ap + b)$
$\int_0^t F(\tau)\,d\tau$	$\frac{1}{p}\,\varphi(p)$ (regulă de integrare)
$\frac{F(t)}{t}$	$\int_p^\infty \varphi(p)\,dp$ (regulă de împărţire)
$\frac{d^n}{dt^n}\,F(t)$	$p^n\varphi(p) - [p^{n-1}F(0) + p^{n-2}F'(0) + \ldots + F^{n-1}(0)]$
$(-1)^n t^n F(t)$	$\frac{d^n}{dp^n}\,\varphi(p)$ (regulă de înmulţire)
$F_1(t) * F_2(t) = \int_0^t F_1(\tau)\cdot F_2(t-\tau)\cdot d\tau$	$\varphi_1(p)\cdot\varphi_2(p)$ (teorema produsului)

$F(t)$	$\varphi(p)$	$F(t)$	$\varphi(p)$
1	$\frac{1}{p}$	t	$\frac{1}{p^2}$
$\frac{t^n}{n!}$	$\frac{1}{p^{n+1}}$ (n număr întreg)	$e^{\pm at}$	$\frac{1}{(p \mp a)}$ ($\mathrm{Re}\,p > \mathrm{Re}\,a$)
$1 - e^{-at}$	$\frac{a}{p(p+a)}$	te^{-at}	$\frac{1}{(p+a)^2}$
$\sin at$	$\frac{a}{p^2 + a^2}$	$\cos at$	$\frac{p}{p^2 + a^2}$
$\mathrm{sh}\,at$	$\frac{a}{p^2 - a^2}$	$\mathrm{ch}\,at$	$\frac{p}{p^2 - a^2}$
$e^{-bt}\sin at$	$\frac{a}{(p+b)^2 + a^2}$	$e^{-bt}\cos at$	$\frac{p+b}{(p+b)^2 + a^2}$
$e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}$	$\frac{a_2 - a_1}{(p+a_1)(p+a_2)}$		

$F(t) = \frac{2e^{-\frac{a_1}{2}t}}{\sqrt{4a_0 - a_1^2}}\,\sin\frac{\sqrt{4a_0 - a_1^2}}{2}\,t$ $F(t) = \frac{2e^{-\frac{a_1}{2}t}}{\sqrt{a_1^2 - 4a_0}}\,\mathrm{sh}\,\frac{\sqrt{a_1^2 - 4a_0}}{2}\,t$	$\varphi(p) = \frac{1}{p^2 + a_1 p + a_0}$

3.2. CÎMPURI PLANE DE POTENŢIAL FĂRĂ SURSE

Un *cîmp fizic* se caracterizează prin liniile sale de cîmp şi liniile echipotenţiale, care trec între limitele acestui cîmp. Geometria unui astfel de cîmp fizic este independentă de tipul acestuia, adică el este supus aceloraşi legi geometrice, indiferent că este vorba de un cîmp electrostatic, un cîmp magnetostatic, un cîmp electric sau un cîmp de căldură. Liniile de cîmp şi cele echipotenţiale sînt perpendiculare între ele în oricare punct al cîmpului. Cazul cel mai simplu îl constituie *cîmpul omogen*.

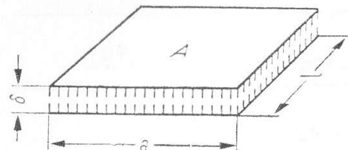


Fig. 3.1. Cîmp omogen.

Fie un cîmp omogen (fig. 3.1) între două plăci plane de lăţimea a, lungimea l şi distanţa între ele δ (fenomenele marginale nu se iau deocamdată în consideraţie). *Conductanţa geometrică a* unei astfel de configuraţii este

$$G_g = \frac{A}{\delta} = \frac{a}{\delta} l. \qquad (3.1)$$

Raportul de lungimi a/δ este denumit *conductanţă geometrică raportată la lungime,*

$$\Lambda_g = \frac{G_g}{l} = \frac{a}{\delta}. \qquad (3.2)$$

Această mărime are dimensiunea unei lungimi cu exponentul zero [1]).

Cîmpurile care în orice secţiune paralelă cu planul format de muchiile a şi δ prezintă acelaşi spectru de linii de cîmp, se numesc *cîmpuri plane*. Şi pentru aceste cîmpuri conductanţa geometrică se poate raporta la lungimea l.

În cazul cîmpurilor plane delimitate prin drepte expresia conductanţei geometrice raportate la lungime se poate aduce la forma corespunzătoare cîmpului omogen prin expresia

$$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} + \zeta \qquad (3.3)$$

sau

$$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} + \zeta \frac{b}{\delta}. \qquad (3.4)$$

În cazul cîmpurilor delimitate prin cercuri se obţine expresia

$$\Lambda_g = \frac{2\pi r}{\delta} \zeta. \qquad (3.5)$$

Pentru cîmpuri irotaţionale, delimitate prin drepte sau cercuri, sînt date cîteva soluţii în tabelul 3.12 care parţial pot fi utilizate în domeniul construcţiilor de maşini electrice. În tabelul 3.11 sînt date valorile mărimii auxiliare ζ.

Cu ajutorul valorilor numerice din tabelul 3.11, se pot trasa curbe ajutătoare, care uşurează aplicarea funcţiilor respective, de multe ori destul de complicate. Alte posibilităţi de aplicare reies dintr-o teoremă a teoriei potenţialului: prin schimbarea liniilor de cîmp şi a liniilor echipotenţiale între ele, conductanţa geometrică calculată devine o rezistenţă geometrică.

Exemple de aplicare a conductanţelor geometrice la cîmpuri plane irotaţionale fără sursă

Cîmp electrostatic. Capacitatea unei dispoziţii determinate a suprafeţelor conductoare (de ex. nr 1, 2 şi 16 pînă la 20 [2]) este dată de

$$C = \varepsilon \Lambda_g \cdot l. \qquad (3.6)$$

[1]) Astfel de mărimi sînt deseori denumite, pe scurt, dar nu tocmai corect, „fără dimensiune".

[2]) Numerele menţionate aici şi în cele ce urmează se referă la tabelul 3.12.

Capacitatea a doi cilindri paraleli de acelaşi diametru, dar de încărcare diferită, se găseşte (conform nr. 19 din tab. 3.12) cu relaţia

$$C = \varepsilon \frac{1}{2} \Lambda_g \cdot l, \qquad (3.7)$$

în care, corespunzător figurii, litera a reprezintă jumătatea distanţei între centrele cilindrilor.

Cîmpul electric. Pentru calculul *rezistenţei* în curent continuu a unui conductor, liniile echipotenţiale din cazurile 3 pînă la 7 pot fi considerate ca linii de cîmp. Liniile groase marginale devin limita conductorului. Conductanţa geometrică raportată la lungime Λ_g capătă semnificaţia unei rezistenţe geometrice raportate la lungime,

$$R = \rho \Lambda_g \cdot \frac{1}{l} \quad \text{cu} \quad \Lambda_g = \frac{a}{\delta} + \zeta + \frac{c}{b}. \qquad (3.8)$$

Dimensiunile a şi c sînt în direcţia scurgerii, iar l este grosimea conductorului.

Cîmp magnetic. Pentru calculul *fluxurilor magnetice de dispersie* între polii maşinilor sincrone (de ex: nr. 9 pînă la 13 şi nr. 20) sau al dispersiei crestăturilor semiînchise (de ex: nr. 3 pînă la 7) ale maşinilor electrice, *permeanţa*, se calculează cu relaţia

$$\Lambda_m = \mu_0 \Lambda_g l; \qquad (3.9)$$

inductivitatea proprie este dată de

$$L = \mu_0 \Lambda_g l N^2 \quad (N = \text{numărul de spire}). \qquad (3.10)$$

Dacă se doreşte, de exemplu, să se calculeze inductivitatea proprie a unui cablu gol, se pot schimba între ele, în cazul nr. 16, liniile de cîmp cu cele echipotenţiale. Expresia Λ_g de acolo devine astfel rezistenţa geometrică raportată la lungime şi se obţine pentru inductivitatea proprie a cablului gol expresia

$$L = \mu_0 \frac{l}{\Lambda_g} = \mu_0 \frac{l}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}. \qquad (3.11)$$

Factorul de crestătură (factor Carter) este raportul dintre permeanţa întrefierului la statoare şi rotoare fără crestături şi permeanţa în cazul în care una din aceste două părţi este cu crestături (de ex. nr. 2 şi 10):

$$k_c = \frac{(a+b)}{\delta \Lambda_g} = \frac{a+b}{a + \zeta b}. \qquad (3.12)$$

Corespunzător figurilor din cazurile nr. 2 şi 10, a reprezintă aici jumătate din lăţimea dintelui, iar b jumătate din lăţimea crestăturii. Mărimea ajutătoare ζ trebuie determinată pentru $x = \frac{b}{\delta}$, unde δ este întrefierul. ζb este deci jumătate din partea magnetică activă a lăţimii crestăturii.

Forţa magnetică axială la maşinile electrice este influenţată de conductanţa cîmpului magnetic la capetele frontale ale maşinii la o deplasare axială. Energia cîmpului magnetic la unul din capete este

$$W = \frac{1}{2} \int_V BH \, dV = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} l \delta^2 \Lambda_g. \qquad (3.13)$$

cu conductanţa cîmpului din întrefier, conform nr. 14,

$$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} - \zeta + \frac{1}{\pi}\ln\left(\frac{\pi}{2}\,\frac{c}{\delta}\right) \quad \text{şi} \quad l = \pi D. \tag{3.14}$$

Aici D este o valoare medie cuprinsă între diametrul interior al statorului şi diametrul rotorului. Forţa magnetică la un capăt al maşinii este deci

$$F = \frac{\partial W}{\partial b} = \frac{\pi}{2}\,\frac{B^2}{\mu_0}\,D\delta^2\,\frac{\partial \Lambda_g}{\partial b} = -\frac{\pi}{2}\,\frac{B^2}{\mu_0}\,D\delta^2\,\frac{\partial \zeta}{\zeta b}. \tag{3.15}$$

Cîmpul fluxului de căldură. Coeficientul de conductibilitate calorică al unei dispoziţii oarecare este conform ecuaţiilor (3.1) şi (3.2)

$$\Lambda_w = \lambda \Lambda_g \cdot l. \tag{3.16}$$

Tabelul 3.11. **Valori numerice pentru mărimile auxiliare** ζ, $\left(\frac{h}{b}, \text{ Nr. } 13\right)$ **şi** $\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}, \text{ Nr. } 15\right)$ **în funcţie de** x

Nr. \ x	0,0	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
2	1,0000	0,8127	0,7480	0,6645	0,5573	0,4796	0,4211	0,3760	0,3109	0,2661
8	0,3951	0,5983	0,6677	0,7587	0,8908	1,0009	1,0955	1,1780	1,3172	1,4282
9	0,4413	0,8395	0,9331	1,0491	1,2021	1,3238	1,4253	1,5124	1,6569	1,7743
10	1,0000	0,8479	0,7935	0,7206	0,6245	0,5513	0,4945	0,4491	0,3814	0,3331
14	−0,3183	−0,0300	+0,1043	0,3214	0,7134	1,1304	1,5636	2,0080	2,9188	3,8490
15	0,0000	0,2952	0,3888	0,5000	0,6257	0,7048	0,7578	0,7952	0,8440	0,8743

Nr. \ x	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
3	0,0000	0,0154	0,0557	0,1249	0,1860	0,2387	0,3250	0,4503	0,5406	0,6110
4	0,0000	0,0432	0,1131	0,2155	0,2996	0,3698	0,4823	0,6464	0,7565	0,8451
5	0,0000	0,0508	0,1291	0,2412	0,3321	0,4077	0,5282	0,6992	0,8201	0,9160
6	0,0000	0,0649	0,1587	0,2889	0,3930	0,4789	0,6154	0,8086	0,9459	1,0523
7	0,0000	0,1017	0,2371	0,4173	0,5586	0,6744	0,8573	1,1154	1,2985	1,4406
11	0,2794	0,3734	0,4954	0,6614	0,7949	0,9062	1,0814	1,3389	1,5223	1,6623
12	−0,2794	−0,1906	−0,0929	0,0178	0,0909	0,1406	0,2110	0,2834	0,3213	0,3381
13	0,0000	0,0301	0,0892	0,1717	0,2323	0,2774	0,3391	0,4071	0,4431	0,4656

Nr. \ x	1,00	1,04	1,10	1,30	1,60	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
16	1,0000	1,0199	1,0490	1,1434	1,2766	1,4427	1,6370	1,8205	2,1640	2,4853
17, 18, 19	0,0000	0,1419	0,2254	0,3966	0,5729	0,7593	0,9574	1,1346	1,4539	1,7449
20	0,0000	0,1094	0,1836	0,3233	0,4322	0,5390	0,6517	0,7470	0,9217	1,0788

Numărul care se termină cu 5, s-a format prin rotunjire în minus iar un număr care se termină cu 5 s-a format prin rotunjire în plus.

Tabelul 3.12. **Conductanţe geometrice pe unitatea de lungime, pentru cîmpuri irotaţionale, fără sursă**

Nr.	Figura	Conductanţa geometrică	Formula	Aplicare
			I. Delimitare prin drepte	
1		$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} + \zeta$	$\zeta = \frac{2}{\pi}\ln 2 = 0{,}4413$	Condensator cu trei plăci
2		$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} + \zeta\frac{b}{\delta}$	$\zeta = 1 - \frac{1}{\pi x}\,\frac{2\alpha^2}{1-\alpha^2}$, $x = \frac{b}{\delta}$; $\pi x = \frac{2\alpha}{1-\alpha^2} + \ln\frac{1+\alpha}{1-\alpha}$	Condensator pentru inel de protecţie Factor de de crestătură
3		$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} + \zeta + \frac{c}{b}$	$\zeta = \frac{1}{2\pi}\left[\left(x + \frac{1}{x}\right)\ln\frac{x+1}{x-1} + 2\ln\frac{1}{4}\left(x - \frac{1}{x}\right)\right]$; $x = \frac{b}{\delta}$, $b > \delta$	Crestătură semiînchisă
4	$x = \frac{b}{\delta}$, $b > \delta$	$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} + \zeta + \frac{c}{b}$	$\vartheta = 18°$; $\zeta = \frac{1}{2\pi}\left[\sqrt{5}\ln\frac{1+\sqrt{5}}{2} - \frac{5}{2}\ln 5\right] - \frac{1}{4}\left[\sqrt{5 - 2\sqrt{5}}\,x + \sqrt{1 + \frac{2}{\sqrt{5}}}\cdot\frac{1}{x}\right] + \frac{1}{2\pi}\left\{\left(x + \frac{1}{x}\right)\left[\frac{1+\sqrt{5}}{4}\ln\left(x + \frac{1-\sqrt{5}}{2}\sqrt{x+1}\right) + \frac{1-\sqrt{5}}{4}\times\ln\left(x + \frac{1+\sqrt{5}}{2}\sqrt{x}+1\right) - \ln(\sqrt{x}-1)\right] + 2\ln(x^3 - \sqrt{x}) - \frac{7}{2}\ln x + \right.$	Idem

Nr.	Figura	Conductanța geometrică	Formula	Aplicare
4			$+x\left[\sqrt{\frac{5+\sqrt{5}}{2}}\,\text{arc tg}\,\frac{1+\sqrt{5}+4\sqrt{x}}{2\sqrt{\frac{5-\sqrt{5}}{2}}}-\sqrt{\frac{5-\sqrt{5}}{2}}\,\text{arc tg}\,\frac{1-\sqrt{5}+4\sqrt{x}}{2\sqrt{\frac{5+\sqrt{5}}{2}}}\right]+\frac{1}{x}\left[\sqrt{\frac{5+\sqrt{5}}{2}}\,\text{arc tg}\,\frac{1+\sqrt{5}+\frac{4}{\sqrt{x}}}{2\sqrt{\frac{5-\sqrt{5}}{2}}}-\sqrt{\frac{5-\sqrt{5}}{2}}\,\text{arc tg}\,\frac{1-\sqrt{5}+\frac{4}{\sqrt{x}}}{2\sqrt{\frac{5+\sqrt{5}}{2}}}\right]\Bigg\}$	Idem
5		$\Lambda_{g}=\frac{a}{\delta}+\zeta+\frac{c}{b}$	$\vartheta=22{,}5°$ $\zeta=\frac{1}{2\pi}\Bigg\{\sqrt{8}\ln(1+\sqrt{2})-8\ln 2+2\ln(x^{3}-x^{\frac{1}{3}})-\frac{10}{3}\ln x+\left(x+\frac{1}{x}\right)\left(\frac{\ln x^{\frac{1}{3}}+1}{x^{\frac{1}{3}}-1}-\frac{1}{\sqrt{2}}\ln\frac{1+\sqrt{2}\,x^{\frac{1}{3}}+x^{\frac{2}{3}}}{1-\sqrt{2}\,x^{\frac{1}{3}}+x^{\frac{2}{3}}}\right)+\left(x-\frac{1}{x}\right)\left(2\,\text{arc tg}\,x^{\frac{1}{3}}+\sqrt{2}\,\text{arc tg}\,\frac{\sqrt{2}\,x^{\frac{1}{3}}}{x^{\frac{1}{3}}-1}-\pi\right)\Bigg\}$	Idem
6		$\Lambda_{g}=\frac{a}{\delta}+\zeta+\frac{c}{b}$	$\vartheta=30{,}0°$ $\zeta=\frac{1}{2x}\Bigg\{2\ln(x^{3}-1)-3\ln 3x+\left(x+\frac{1}{x}\right)\times\left[\frac{1}{2}\ln(x^{2}+x+1)-\ln(x-1)\right]+\sqrt{3}\left[x\,\text{arc tg}\,\frac{\sqrt{3}}{1+2x}+\frac{1}{x}\left(\text{arc tg}\,\frac{\sqrt{3}\,x}{2+x}-\frac{\pi}{3}\right)\right]\Bigg\}$	Idem
7		$\Lambda_{g}=\frac{a}{\delta}+\zeta+\frac{c}{b}$	$\vartheta=45{,}0°$ $\zeta=\frac{1}{2\pi}\left\{\left(x+\frac{1}{x}\right)\ln\frac{x+1}{x-1}+2\left[\ln\frac{1}{4}\left(x-\frac{1}{x}\right)+\ln(x^{2}+1)-\ln 2x\right]+\left(x-\frac{1}{x}\right)(\pi-2\,\text{arc tg}\,x)\right\}$	Idem
8		$\Lambda_{g}=\frac{a}{\delta}+\zeta$	$\zeta=\frac{1}{\pi}\ln\left[\frac{\pi^{2}}{4}(x+1)^{2}+1\right],\quad x=\frac{b}{\delta}$	Întrefier și spațiu frontal la mașini electrice
9		$\Lambda_{g}=\frac{a}{\delta}+\zeta$	$\zeta=\frac{1}{\pi}[(x+2)\ln(x+2)-x\ln x],\quad x=\frac{b}{\delta}$	Dispersie la poli

Nr.	Figura	Conductanța geometrică	Formula	Aplicare
10		$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} + \zeta \frac{b}{\delta}$	$\zeta = 1 + \frac{1}{\pi}\left[\frac{1}{x}\ln(x^2+1) - 2\,\mathrm{arc\,tg}\,x\right], \quad x = \frac{b}{\delta}$	Factor de crestătură (Factorul lui Carter)
11 12 13		$\Lambda_n = \frac{a}{\delta} + \zeta_n$ $\Lambda_s = \frac{c}{b} - \zeta_s$	$\zeta_n = x\left(1 - \frac{2}{\pi}\mathrm{arc\,tg}\,x\right) + \frac{1}{\pi}\ln\left[\frac{1}{4}(x^2+1)\right], \quad x = \frac{b}{\delta}$ $\zeta_s = \frac{1}{x}\left(\frac{2}{\pi}\mathrm{arc\,tg}\frac{1}{x} - 1\right) - \frac{1}{\pi}\ln\left[\frac{1}{4}\left(\frac{1}{x^2}+1\right)\right], \quad b > \delta$ $\frac{h}{b} = \frac{1}{\pi}\left[\ln\frac{1+\alpha}{1-\alpha} + \frac{2}{x}\mathrm{arc\,tg}\frac{1}{\alpha x}\right] - \frac{1}{x}, \quad \alpha = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{x^2}\right)}$	Flux magnetic sub pol și în spațiu între poli Flux util: indice *n* Flux de dispersie: indice *s*
14 15		$\Lambda_g = \frac{a}{\delta} - \zeta + \frac{1}{\pi}\ln\left(\frac{\pi}{2}\frac{c}{\delta}\right)$ $\frac{\partial \Lambda_g}{\partial b} = -\frac{1}{\delta}\frac{\partial \zeta}{\partial b}$	$\zeta = \frac{x}{2}\left[\frac{2}{\pi}\mathrm{arc\,tg}\,x + 1\right] - \frac{2}{\pi}[\ln(x^2+1) + 2]$ $\frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{2}{\pi}\mathrm{arc\,tg}\,x, \quad x = \frac{b}{\delta}$	Întrefier și spațiu frontal al mașinilor electrice Forță axială la mașini electrice
			II. Delimitare prin cercuri	
16		$\Lambda_g = \frac{2\pi}{\ln\frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi r_1}{\delta}\zeta = \frac{2\pi r_1}{r_2 - r_1}\zeta = \frac{2\pi}{x-1}\zeta$	$\zeta = \frac{x-1}{\ln x} \quad \text{cu } x = \frac{r_2}{r_1}$	Cilindri concentrici Cablu cu conductoare tubulare
17		$\Lambda_g = \frac{2\pi}{\mathrm{arg\,ch}\,x} = \frac{2\pi}{x-1}\zeta$ $x = \frac{r_1^2 + r_2^2 - a^2}{2r_1r_2}$	$\zeta = \frac{x-1}{\mathrm{arg\,ch}\,x} = \frac{x-1}{\ln(x + \sqrt{x^2-1})}$	Cilindri excentrici
18		$\Lambda_g = \frac{2\pi}{\mathrm{arg\,ch}\,x} = \frac{2\pi}{x-1}\zeta$ $x = \frac{a^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1r_2}$	$\zeta = \frac{x-1}{\mathrm{arg\,ch}\,x} = \frac{x-1}{\ln(x + \sqrt{x^2-1})}$	Cilindri paraleli
19		$\Lambda_g = \frac{2\pi}{\mathrm{arg\,ch}\,x} = \frac{2\pi}{x-1}\zeta$ $x = \frac{a}{r}$	$\zeta = \frac{x-1}{\mathrm{arg\,ch}\,x} = \frac{x-1}{\ln(x + \sqrt{x^2-1})}$	Cilindru și plan
20		$\Lambda_g = \frac{2\pi}{x-1}\zeta$ $x = \frac{a}{r}$	$\zeta = \frac{x-1}{2}\,\frac{\coth^2\frac{\pi}{4x} + \mathrm{ctg}^2\frac{\pi}{4x}}{\coth^2\frac{\pi}{4x}\ln\mathrm{ctg}\frac{\pi}{4x} + \mathrm{ctg}\frac{\pi}{4x}\ln\coth\frac{\pi}{4x}}$	Flux de dispersie al pieselor polare rotunde

Explicații la figuri:

——— linie echipotențială, delimitare; ▨ linie echipotențială, delimitare, dar având partea din spate inaccesibilă; ------- linie de cîmp impusă,

3.3. REGULILE DE SEMN ŞI DE SENS

În cazul studiului fenomenelor într-un circuit de curent continuu sau alternativ, trebuie reprezentată mai întîi schema de conexiuni a acestui circuit. Apoi trebuie stabilit sensul pozitiv al tensiunilor şi al curenţilor, care se notează prin săgeţi de referinţă pe schemă. Abia acum poate fi scrisă ecuaţia de stare a circuitului. La sisteme de curent alternativ, în locul acesteia poate fi trasată, ca reprezentare geometrică a ecuaţiei de stare, *diagrama fazorială.*

Simbolul pentru tensiuni şi curenţi

În schemele de conexiuni *sensul de referinţă al unei tensiuni* se reprezintă printr-o *săgeată.* Această săgeată (fig. 3.2) este dirijată dinspre o bornă *1*, căreia i se atribuie potenţialul mai ridicat, înspre o bornă *2*, căreia i se atribuie potenţialul mai coborît.

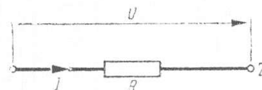


Fig. 3.2. Săgeţi de referinţă la un conductor de rezistenţă R $U = IR$.

Acolo unde poate fi presupus sau cunoscut dinainte, *sensul de referinţă al curentului* se va alege şi se va nota printr-o săgeată în aşa fel, încît vîrful săgeţii de pe conductor să fie îndreptat dinspre borna cu potenţial mai ridicat spre borna cu potenţialul mai coborît.

Dacă din calculul unei mărimi a reţelei (tensiune sau curent) rezultă o valoare pozitivă, aceasta înseamnă că sensul presupus şi cel real coincid. În caz contrar se obţine semnul negativ. De exemplu, conform primei teoreme a lui Kirchhoff suma tuturor curenţilor în fiecare nod este nulă. La efectuarea acestei sume curenţii ale căror săgeţi de referinţă sînt îndreptate spre nod au un semn, iar aceia ale căror săgeţi sînt îndreptate dinspre nod spre exterior au semnul opus. Conform teoremei a doua a lui Kirchhoff suma tuturor tensiunilor parţiale de-a lungul unui circuit este nulă. Acest lucru este valabil pentru fiecare din cele două sensuri de parcurgere posibile. Alegînd un anumit sens de parcurgere, toate tensiunile parţiale ale căror sensuri de referinţă coincid cu sensul de parcurgere ales vor avea semnul pozitiv, în timp ce toate celelalte vor avea semnul negativ [1]).

În cazul unor reţele puternic buclate poate fi util să se adopte un acelaşi sens pozitiv pentru toate mărimile reţelei şi un acelaşi sens pozitiv de parcurgere. În acest caz se poate alege o singură săgeată de referinţă.

La curenţi şi tensiuni alternative se poate acorda uneia din cele două direcţii posibile semnul pozitiv. În plus este necesar ca în problemele tehnicii curenţilor alternativi să fie clarificată succesiunea în timp a fiecărei mărimi în parte, prin alegerea unei *faze de referinţă.*

[1]) Această metodă nu este unică şi nu este utilizată întotdeauna.

Exemple

Deşi sensurile de referinţă pentru tensiuni şi curenţi şi implicit poziţia săgeţilor de referinţă pot fi alese în mod arbitrar, au intrat în uzanţă anumite dispoziţii ale săgeţilor de referinţă pentru dipolii generator, dipolii receptor şi pentru cuadripoli. În continuare sînt date cîteva exemple:

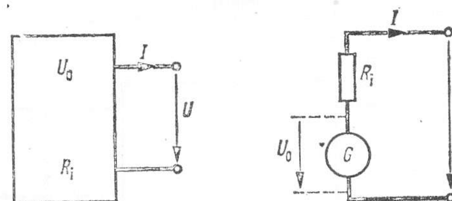


Fig. 3.3. Dipol generator (sistem de săgeţi de referinţă pentru generator).

$U - U_0 = R_i \cdot I$; pentru $I = 0$, $U = U_0$.

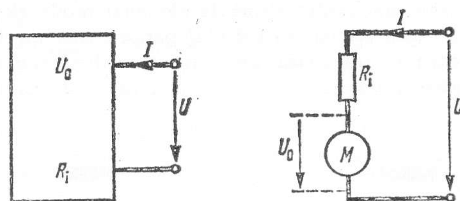


Fig. 3.4. Dipol receptor (sistem de săgeţi de referinţă pentru receptor).

$U = U_0 + R_i I$; pentru $I = 0$ este necesar $U = U_0$.

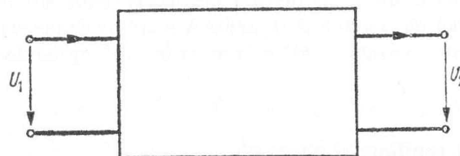


Fig. 3.5. Cuadripol (sistem de săgeţi de referinţă în lanţ).

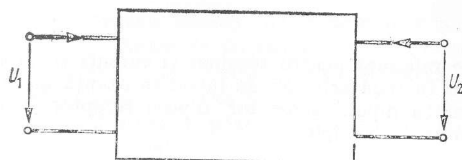


Fig. 3.6. Cuadripol (sistem de săgeți de referință simetric).

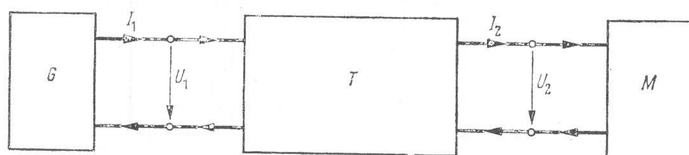


Fig. 3.7. Sistem simplu de transmitere a energiei cu sursă (generator), transformator și consumator (motor).

Bobine și înfășurări

Dacă între două sau mai multe elemente ale unei rețele electrice există cuplaje magnetice, trebuie să se țină seama, în calculul parametrilor electrici ai rețelei, și de rețeaua magnetică. Pentru a caracteriza interacțiunea a două sau a mai multor bobine care fac parte din aceeași ramură a unei rețele magnetice (transformator, amplificator



Fig. 3.8. Exemplu de utilizare a punctului de înfășurare (polaritate). (L este inductivitatea totală; L_1, L_2 – inductivitățile proprii ale celor două bobine; L_{12} – inductivitatea mutuală a celor două bobine).

magnetic), se poate marca începutul fiecărei înfășurări printr-un punct (polaritate) la un colț al fiecărui simbol de bobină. Prin această marcare se presupune că fiecare spiră înconjoară miezul comun (miezul de fier) în același sens, începînd de la capătul cu punct (fig. 3.8).

Puterea în curent continuu și alternativ

În sistemul de referință pentru generator (fig. 3.3) săgețile de referință pentru curent și pentru tensiune au același sens în raport cu sensul de parcurgere. La producerea

de energie direcția curentului coincide cu aceea a săgeții de referință pentru curent. Puterea produsă $P = U.I$ capătă sensul pozitiv. În cazul consumului de energie sensul curentului este opus săgeții de referință. Puterea absorbită este în acest caz negativă.

La sistemul de referință pentru consumator (fig. 3.4) săgețile de referință pentru curent și tensiune au sensuri opuse față de sensul de parcurgere. În cazul consumului de energie, curentul are aceeași direcție cu a săgeții sale de referință. Prin urmare puterea absorbită $P = U \cdot I$ capătă în acest caz semnul pozitiv și cea produsă, semnul negativ.

Această reglementare este valabilă fără restricții pentru curent continuu. În cazul circuitelor de curent alternativ ea este valabilă separat pentru puterea activă și pentru puterea reactivă. După C.E.I., prin putere reactivă trebuie înțeleasă puterea produsă de un condensator și cea absorbită de o bobină cu reactanță inductivă. Pe baza acestei reglementări se poate spune în loc de putere reactivă de magnetizare, pe scurt putere reactivă subcap. 3.4).

3.4. MĂRIMI COMPLEXE ÎN CALCULUL CIRCUITELOR DE CURENT ALTERNATIV

În tehnica de calcul a rețelelor de curent alternativ, nu se utilizează valorile instantanee ale curenților și ale tensiunilor, ci se ține seama de valorile lor efective și de unghiul de fază.

O mărime care variază în timp după o lege sinusoidală sau cosinusoidală, de exemplu o tensiune alternativă u, poate fi reprezentată printr-un vector fix a cărui lungime este proporțională cu valoarea eficace $U = \hat{u}/\sqrt{2}$; dacă se proiectează acest vector pe o axă a timpului (adică o axă gradată în unități de timp, pe care este fixat un sens pozitiv), care se rotește cu viteza unghiulară (pulsația) $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ (unde f = frecvența; T = perioada) în sens invers celui trigonometric, — durata unei rotații complete a vectorului fiind egală cu perioada mărimii sinusoidale, — atunci proiecțiile pe axa timpului în fiecare moment dau variația în timp a tensiunii alternative:

$$u = \hat{u} \cos \omega t = \sqrt{2}\, U \cos \omega t \text{ (û este valoarea maximă).} \quad (3.17)$$

Același rezultat se obține, dacă vectorul se rotește cu viteza unghiulară ω în sens trigonometric (adică contrar acelor ceasornicului) și se proiectează pe axa reală și pe cea imaginară ale unui sistem fix de coordonate:

$$\underline{U} = \hat{u} e^{j\omega t} = \sqrt{2}\, U e^{j\omega t} = \sqrt{2}\, U(\cos \omega t + j \sin \omega t). \quad (3.18)$$

Calculul simbolic folosește regulile calculului vectorial pentru mărimi reprezentate în planul complex (Gauss). Această metodă este utilizată în special la analiza proceselor

avînd aceeași frecvență. Sînt valabile următoarele reguli de calcul (fig. 3.9):

$\underline{a} = a_1 = ja_2$	expresia în complex a unui fazor;
$\lvert\underline{a}\rvert = a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$	modulul unui fazor
$\alpha = \text{arc tg}\,\frac{a_2}{a_1}$	unghiul (argumentul) unui fazor față de axa reală pozitivă;
$a_1 = a \cos \alpha$	partea reală a unui fazor;
$a_2 = a \sin \alpha$	partea imaginară a unui fazor;
$\underline{a} = a(\cos\alpha + \mathrm{j}\sin\alpha) = a\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\alpha}$	expresia în coordonate polare complexe a unui fazor;
$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\alpha} = \cos\alpha + \mathrm{j}\sin\alpha$	este un operator (fazor unitate).

Prin multiplicarea unui fazor cu acest operator $\mathrm{e}^{\mathrm{j}\alpha}$, fazorul este rotit cu unghiul α în sensul pozitiv al unghiurilor pentru α pozitiv, și în sensul negativ al unghiurilor pentru α negativ, fără ca valoarea sa să fie modificată prin aceasta.

Pentru un operator care se rotește cu un unghi drept sau cu un multiplu al acestuia, sînt valabile următoarele:

Operatorul	Rotește fazorul în
$\mathrm{e}^{j\frac{\pi}{2}} = \mathrm{j} = \sqrt{-1}$	sensul pozitiv al unghiurilor cu un unghi drept (90°)
$\mathrm{e}^{j\pi} = \mathrm{j}^2 = -1$	sensul pozitiv al unghiurilor cu *două* unghiuri drepte (180°)
$\mathrm{e}^{j\frac{3\pi}{2}} = \mathrm{j}^3 = -\mathrm{j}$	sensul pozitiv al unghiurilor cu trei unghiuri drepte (270°)
$\mathrm{e}^{j2\pi} = \mathrm{j}^4 = +1$	sensul pozitiv al unghiurilor cu patru unghiuri drepte (360°)
$\mathrm{e}^{-j\frac{\pi}{2}} = \mathrm{j}^{-1} = -\mathrm{j}$	sensul negativ al unghiurilor cu *un* unghi drept (90°).

Fazorul $\underline{a}^*$ este fazorul complex conjugat al lui $\underline{a}$ (fig. 3.9)

$$\underline{a}^* = a_1 - \mathrm{j}a_2 = a\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\alpha}.$$

Reguli de calcul

$$\underline{a} + \underline{a}^* = 2a_1, \quad \underline{a}\cdot\underline{a}^* = a_1^2 + a_2^2 = a^2;$$

$$\underline{a} - \underline{a}^* = \mathrm{j}2a_2, \quad \frac{\underline{a}}{\underline{a}^*} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\alpha}.$$

Este de remarcat că, prin împărțirea unui fazor prin fazorul complex conjugat corespunzător, se obține un operator care provoacă o rotire cu 2α.

Suma a doi fazori. Pentru a aduna doi fazori $\underline{a}$ și $\underline{b}$ se adună separat părțile reale și părțile imaginare:

$$\underline{a} = a_1 + \mathrm{j}a_2$$
$$\underline{b} = b_1 + \mathrm{j}b_2$$
$$\underline{a} + \underline{b} = (a_1 + b_1) + \mathrm{j}(a_2 + b_2)$$

Produsul a doi fazori este dat de produsul modulelor și suma argumentelor:

$$\underline{a}\cdot\underline{b} = (a_1 + \mathrm{j}a_2)\,(b_1 + \mathrm{j}b_2) = a\mathrm{e}^{\mathrm{j}\alpha}\cdot b\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta}$$

$$\underline{a}\cdot\underline{b} = (a_1b_1 - a_2b_2) + \mathrm{j}(a_1b_2 + a_2b_1) = ab\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\alpha+\beta)}.$$

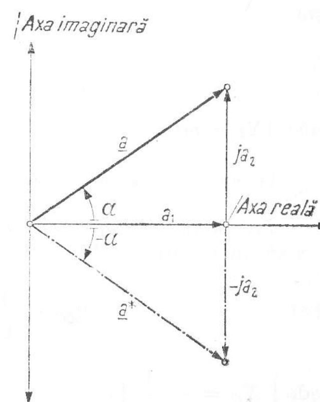


Fig. 3.9. Fazorul $\underline{a}$ în plan complex (Gauss) și fazorul său conjugat $\underline{a}^*$.

Derivarea și integrarea unui fazor. Dacă unghiul de fază a unui fazor este funcție de timp, de exemplu

$$\alpha = \omega t + \varphi$$

atunci fazorul

$$\underline{a} = a\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi)}$$

poate fi derivat în raport cu timpul,

$$\frac{\mathrm{d}\underline{a}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{t}\left[a\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi)}\right] = \mathrm{j}\omega\cdot a\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi)} = \mathrm{j}\omega\underline{a}.$$

Prin derivarea unui fazor $\underline{a}$ în raport cu timpul, modulul său se multiplică cu pulsația ω, iar argumentul său este mărit cu $\frac{\pi}{2}$, adică fazorul mărit de ω ori se rotește în sens trigonometric cu 90°.

Prin *integrarea în raport cu timpul* a unui fazor

$$\int\underline{a}\mathrm{d}t = \int a\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi)}\,\mathrm{d}t = \frac{1}{\mathrm{j}\omega}\,a\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi)} = -\,\mathrm{j}\,\frac{\underline{a}}{\omega}$$

modulul fazorului $\underline{a}$ se împarte cu ω și argumentul său se reduce cu $\frac{\pi}{2}$, adică fazorul se reduce la $\frac{1}{\omega}$ din valoarea sa inițială și este rotit cu 90° în sens invers celui trigonometric.

Aplicații

Tensiunea la bornele unei bobine de reactanță (fără pierderi ohmice) străbătută de un curent

$$\underline{I} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\omega t} = I e^{j\omega t} \tag{3.19}$$

este

$$\underline{U}_L = L \frac{dI}{dt} = j\omega L \underline{I} = jX_L \underline{I} \tag{3.20}$$

unde $(X_L = \omega L)$.

Tensiunea este în avans față de curent cu un sfert de perioadă.

Tensiunea la bornele unui condensator (fără pierderi ohmice) parcurs de un curent $\underline{I}$ conform ecuației (3.19) este

$$\underline{U}_C = \frac{1}{C}\int \underline{I}\, dt = -j\frac{1}{\omega C}\underline{I} = jX_C I \tag{3.21}$$

unde $\left(X_C = -\frac{1}{\omega C}\right)$.

Tensiunea este în urma curentului cu un sfert de perioadă.

Tensiunea la bornele unei bobine cu rezistență și reactanță inductivă (legea lui Ohm pentru curent alternativ) parcursă de un curent conform ecuației (3.19) este:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L = R\underline{I} + \omega L\underline{I}. \tag{3.22}$$

Tensiunea este în avans față de curent cu un unghi

$$\varphi = \text{arc tg}\,\frac{\omega L}{R}. \tag{3.23}$$

Impedanța complexă este dată de

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R + j\omega L = R + jX_L = Z \cdot e^{j\varphi}, \tag{3.24}$$

iar modulul ei este:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_l^2}. \tag{3.25}$$

Tensiunea la bornele unui circuit serie format dintr-un rezistor (rezistență ohmică) *o bobină de reactanță* (inductivitate) *și un condensator* (capacitate) parcurs de un curent conform ecuației (3.19) este egală cu

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = \left(R + j\omega L - \frac{j}{\omega C}\right)\underline{I} = (R + jX)\,\underline{I}. \tag{3.26}$$

Ea este în avans față de curent cu un unghi

$$\varphi = \text{arc tg}\,\frac{X}{R} \quad \left(X = X_L + X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \tag{3.27}$$

Impedanța complexă este dată de

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + jX = Ze^{j\varphi}, \tag{3.28}$$

și modulul ei este

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}. \tag{3.29}$$

Dacă $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ se obține frecvența de rezonanță

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \tag{3.30}$$

iar circuitul serie format din rezistență ohmică, bobină de reactanță și condensator se comportă ca și o rezistență ohmică. Frecvența de rezonanță f_0 este frecvența pentru un *circuit oscilant neamortizat.*

Deoarece pentru calculul puterilor activă și reactivă defazajul dintre tensiune și curent are importanță, puterea aparentă se exprimă în complex astfel

$$\underline{S} = \underline{U}\underline{I}^* = Ue^{j\varphi_u} \cdot Ie^{-j\varphi_i} = UIe^{j\varphi};$$

$$\underline{S} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = P + jQ, \tag{3.31}$$

unde $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$.

Dacă fixăm curentul $\underline{I}$ în axa pozitivă reală a sistemului de coordonate complexe avem $\underline{I} = \underline{I}^* = I$; în cazul unei tensiuni $\underline{U}_L$ conform ecuației (3.20) pentru puterea reactivă absorbită de o bobină de reactanță se obține o valoare imaginară pozitivă; în cazul unei tensiuni $\underline{U}_C$ conform ecuației (3.21) se obține pentru puterea reactivă absorbită de un condensator o valoare imaginară negativă.

Tabelul 3.13. **Relaţii între funcţiile trigonometrice şi hiperbolice pentru scriere în complex**

$\cos j\varphi = \mathrm{ch}\,\varphi$	$e^{\varphi} = \cos j\varphi - j\sin j\varphi = \mathrm{ch}\,\varphi + \mathrm{sh}\,\varphi$	$\mathrm{ch}\, j\varphi = \cos\varphi$
$\sin j\varphi = j\,\mathrm{sh}\,\varphi$	$e^{j\varphi} = \cos\varphi + j\sin\varphi = \mathrm{ch}\, j\varphi + \mathrm{sh}\, j\varphi$	$\mathrm{sh}\, j\varphi = j\sin\varphi$
$\mathrm{tg}\, j\varphi = j\,\mathrm{th}\,\varphi$	$e^{-\varphi} = \cos j\varphi + j\sin j\varphi = \mathrm{ch}\,\varphi - \mathrm{sh}\,\varphi$	$\mathrm{th}\, j\varphi = j\,\mathrm{tg}\,\varphi$
$j\,\mathrm{cotg}\, j\varphi = \mathrm{coth}\,\varphi$	$e^{-j\varphi} = \cos\varphi - j\sin\varphi = \mathrm{ch}\, j\varphi - \mathrm{sh}\, j\varphi$	$j\,\mathrm{coth}\, j\varphi = \mathrm{cotg}\,\varphi$
$2\cos\varphi = e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}$	$e^{x+jy} = ex(\cos y + j\sin y)$	$2\,\mathrm{ch}\,\varphi = e^{\varphi} + e^{-\varphi}$
$2j\sin\varphi = e^{j\varphi} - e^{-j\varphi}$	$e^{j\varphi} = e^{j(\varphi + 2k\pi)}$ $(k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots)$	$2\,\mathrm{sh}\,\varphi = e^{\varphi} - e^{-\varphi}$
$j\,\mathrm{tg}\,\varphi = \dfrac{e^{2j\varphi} - 1}{e^{2j\varphi} + 1}$	$\ln z = \ln(x + jy) = \ln\lvert z\rvert + j(\varphi + 2k\pi)$	$\mathrm{th}\,\varphi = \dfrac{e^{2\varphi} - 1}{e^{2\varphi} + 1}$
$j\arcsin x = \mathrm{argsh}\, jx = \ln(jx + \sqrt{1 - x^2})$	$-j\arcsin jx = \mathrm{argsh}\, x = \ln(x + \sqrt{1 + x^2})$	
$j\arccos x = \mathrm{argch}\, x = \pm\ln(x + j\sqrt{1 - x^2})$	$j\arccos jx = \mathrm{argch}\, jx = \pm\ln(x + \sqrt{1 + x^2}) + \dfrac{\pi}{2}j$	
$2j\,\mathrm{arctg}\, x = 2\,\mathrm{argth}\, jx = \ln(1 + jx) - \ln(1 - jx)$	$-2j\,\mathrm{arctg}\, jx = 2\,\mathrm{argth}\, x = \ln(1 + x) - \ln(1 - x)$	

Tabelul 3.14. **Funcţii trigonometrice cu sin sau cos ca funcţii de intrare, cu cinci zecimale**

$\sin\alpha$	$\cos\alpha$	$\mathrm{tg}\,\alpha$	$\mathrm{cotg}\,\alpha$	α, în rad	$\frac{\pi}{2} - \alpha$, în rad	α°
$\cos\beta$	$\sin\beta$	$\mathrm{cotg}\,\beta$	$\mathrm{tg}\,\beta$	$\frac{\pi}{2} - \beta$, în rad	β, în rad	$90^\circ - \beta^\circ$
0,00	1,00000	0,00000	∞	0,00000	1,57080	0,0000
0,05	$0{,}9987\underline{5}$	0,05006	19,97498	0,05002	1,52078	2,8660
0,10	0,99499	0,10050	9,94987	0,10017	1,47063	5,7392
0,15	0,98869	0,15172	6,59124	0,15057	1,42023	8,6269
0,20	0,97980	0,20412	4,89898	0,20136	1,36944	11,5370
0,25	$0{,}9682\underline{5}$	0,25820	3,87298	0,25268	1,31812	14,4775
0,30	0,95394	0,31449	3,17980	0,30469	1,26610	17,4576
0,35	$0{,}9367\underline{5}$	0,37363	2,67643	0,35757	1,21323	20,4873
0,40	0,91652	0,43644	2,29129	0,41152	1,15928	23,5782
0,45	0,89303	0,50390	1,98451	0,46677	1,10403	26,7437
0,50	0,86603	$0{,}5773\dot{5}$	$1{,}7320\dot{5}$	0,52360	1,04720	30,0000
0,55	0,83516	$0{,}6585\dot{5}$	1,51848	0,58236	0,98843	33,3670
0,60	0,80000	0,75000	1,33333	0,64350	0,92730	36,8699
0,65	0,75993	0,85534	1,16913	0,70758	0,86321	40,5416
0,70	0,71414	0,98020	1,02020	0,77540	0,79540	44,4270
0,75	0,66144	1,13389	0,88192	0,84806	0,72273	48,5904
0,80	0,60000	1,33333	0,75000	0,92730	0,64350	53,1301
0,85	0,52678	1,61357	0,61974	1,01599	0,55481	58,211
0,90	0,43589	2,06474	0,48432	1,11977	0,45103	64,1581
0,95	$0{,}3122\dot{5}$	3,04243	0,32868	1,25324	0,31756	71,8051
1,00	0,00000	∞	0,00000	1,57080	0,00000	90,0000

Un număr care se termină cu $\dot{5}$ s-a format prin rotunjire în plus, un număr terminat cu $\underline{5}$ s-a format prin rotunjire în minus.

3.5. LOCURI GEOMETRICE

Studiul proceselor staţionare în curent alternativ poate fi simplificat folosind reprezentările cu ajutorul locurilor geometrice. Fiecărui punct al locului geometric îi corespunde o anumită valoare a parametrului. De aceea locurile geometrice pot fi considerate scări gradate în planul complex (Gauss). Dacă se porneşte de la circuite liniare, în care toate elementele (rezistenţe, bobine de reactanţă şi condensatoare) sînt independente de sarcină suporţii scărilor sînt curbe algebrice. Parametrul p este în general real şi poate avea valori între $-\infty$ şi $+\infty$.

Ecuaţia generală a dreptei gradate proiectiv este liniară în funcţie de p la numărător şi numitor şi are un numitor real. Pentru $\underline{a} = a_1 + ja_2$ şi $\underline{b} = b_1 + jb_2$ se obţine

$$\underline{K} = \frac{\underline{a} + \underline{b}p}{c + dp}.$$

Această dreaptă trece prin punctele P_0 şi P_∞, care sînt determinate de

$$\underline{K}_0 = \frac{\underline{a}}{c} \quad \text{şi} \quad \underline{K}_\infty = \frac{\underline{b}}{d}$$

(fig. 3.10). Deoarece numitorul este real, el influenţează numai mărimea fazorilor pornind din originea axelor de coordonate aferente diferitelor valori ale parametrilor $\underline{K}$, dar nu şi direcţia lor. În consecinţă poate fi utilizat numărătorul, care reprezintă o dreaptă cu gradaţii liniare

$$\underline{G} = \underline{a} + \underline{b}p$$

pentru raportarea parametrului la $\underline{K}$. Scara la care este reprezentată dreapta $\underline{G}$ poate fi aleasă arbitrar (fig. 3.10). Fazorul care determină distanţa minimă dintre dreaptă şi originea sistemului de axe de coordonate este *pentru dreapta gradată proiectiv*

$$\underline{N}_K = \frac{\underline{a}\underline{b}^* - \underline{a}^*\underline{b}}{2\underline{b}^*c - d\left(\underline{a}\dfrac{\underline{b}^*}{\underline{b}} + \underline{a}^*\right)}.$$

Pentru *dreapta gradată liniar* deci pentru $c = 1$ şi $d = 0$ rezultă

$$\underline{N}_G = \frac{\underline{a}\underline{b}^* - \underline{a}^*\underline{b}}{2\underline{b}^*}.$$

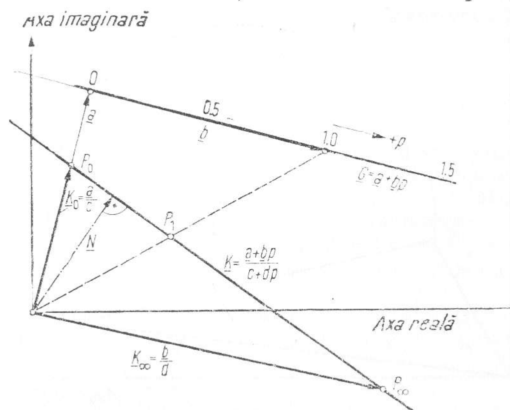


Fig. 3.10. Dreapta gradată proiectiv.

Cercul ca loc geometric cu gradaţie proiectivă este determinat de o funcţie de forma unei fracţii liniare avînd, în general, coeficienţi complecşi

$$\underline{K} = \frac{\underline{a} + \underline{b}p}{\underline{c} + \underline{d}p}.$$

La variaţia parametrului real p vîrful vectorului $\underline{K}$ descrie un cerc trecînd prin punctele P_0 şi P_∞ care sînt determinate de

$$\underline{K}_0 = \frac{\underline{a}}{\underline{c}} \quad \text{şi} \quad \underline{K}_\infty = \frac{\underline{b}}{\underline{d}}.$$

Pentru constituirea cercului mai este necesară încă o indicaţie şi anume centrul cercului care este determinat de vectorul

$$\underline{m} = \frac{\underline{a}\,\underline{d}^* - \underline{b}\,\underline{c}^*}{\underline{c}\,\underline{d}^* - \underline{c}^*\underline{d}} = \mathrm{j}\,\frac{\underline{a}\,\underline{d}^* - \underline{b}\,\underline{c}^*}{2(c_1 d_2 - c_2 d_1)}.$$

Vectorul care determină centrul cercului poate fi scris şi în altă formă

$$\underline{m} = \underline{K}_\infty + \frac{\underline{K}_0 - \underline{K}_\infty}{2}\left(1 - \mathrm{j}\,\frac{q_1}{q_2}\right),$$

unde:

$$\underline{q} = q_1 + \mathrm{j}q_2 = \frac{\underline{c}}{\underline{d}}.$$

Aceasta înseamnă că: centrul cercului este pe axa de simetrie a segmentului P_0P_∞ la distanţa de

$$\underline{h} = \frac{P_0P_\infty}{2}\,\frac{q_1}{q_2}$$

faţă de acest segment (fig. 3.11). Dacă raportul q_1/q_2 este pozitiv, centrul cercului este situat în dreapta segmentului P_0P_∞ (văzut dinspre P_∞); iar dacă este negativ, în stînga ei. Dacă $\underline{c} \perp \underline{d}$ şi în consecinţă $q_1 = 0$, atunci şi $\underline{h} = 0$. În acest caz centrul cercului se află pe linia P_0P_∞.

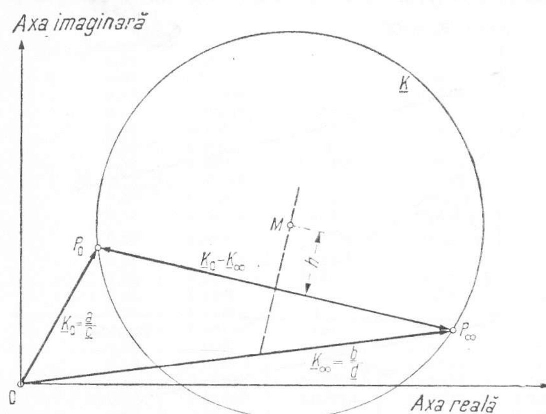


Fig. 3.11. Determinarea centrului cercului.

Pentru a determina distribuţia parametrului pe cerc trebuie să ne imaginăm ori-

ginea axelor de coordonate deplasată spre P_∞, iar partea pozitivă a axei imaginare trecînd prin centrul cercului M (fig. 3.12). Pentru cercul în această poziţie K' ecuaţia dreptei parametrice este

$$\underline{G}' = \lambda(\underline{q}^* + p) = \lambda(q_1 - \mathrm{j}q_2 + p).$$

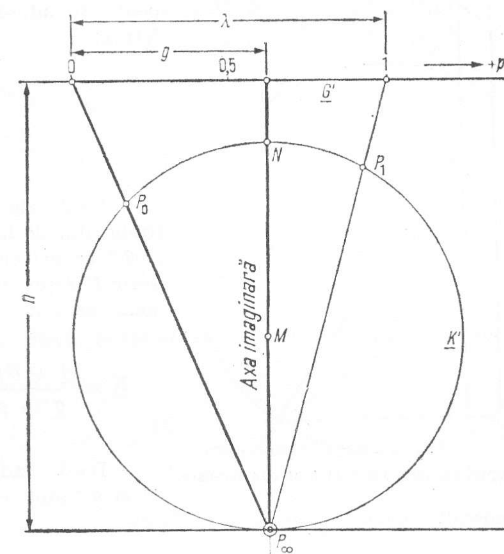


Fig. 3.12. Construcţia dreptei parametrice corespunzătoare originei razelor vectoare în P_∞.

Datele de construcţie ale dreptei parametrice sînt:

$$n = -q_2\lambda \quad \text{şi} \quad g = q_1\lambda.$$

Mărimea λ indică, pe dreapta parametrică gradată liniar, distanţa dintre punctele corespunzătoare la $p = 0$ şi $p = 1$, în unităţi de lungime. În consecinţă λ poate fi denumită „diviziunea scării"; ea poate fi aleasă convenabil. Semnul lui λ se va alege astfel ca n să fie pozitiv. De aici rezultă sensul pozitiv al dreptei parametrice.

Dacă dreapta parametrică corespunzătoare originei razelor vectoare în P_∞ este tangentă într-un punct ce interesează, atunci originea razelor vectoare poate fi mutată în alt punct al cercului aşa cum se arată în fig. 3.13.

Ecuaţia generală a unei conice (cu excepţia cercului), are atît numărătorul cît şi numitorul de gradul doi în p, numărătorul fiind real. Ea poate fi scrisă sub forma:

$$\underline{K} = \frac{\underline{a} + \underline{b}p + \underline{c}p^2}{\underline{d} + \underline{e}p + p^2}.$$

Dacă trinomul de la numitor are două rădăcini distincte reale, atunci conica este o *hiperbolă*; dacă are două rădăcini reale, este o *parabolă*; în sfîrşit, dacă rădăcinile sînt complexe conjugate, conica este o *elipsă*.

Ecuaţia cvadricei bicirculare poate fi adusă întotdeauna la forma:

$$\underline{K} = \frac{\underline{a} + \underline{b}p + \underline{c}p^2}{\underline{d} + \underline{e}p + p^2}.$$

Dacă cele două rădăcini ale trinomului de la numitor sînt $\underline{q}'$ şi $\underline{q}''$ atunci cuartica bicirculară poate fi reprezentată ca suma a două cercuri:

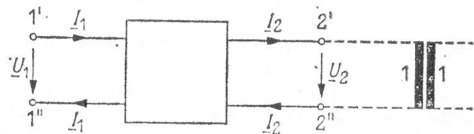
$$\underline{K} = \frac{\underline{A} + \underline{B}p}{\underline{q}' - p} + \frac{\underline{C} + \underline{D}p}{\underline{q}'' - p}.$$

Fig. 3.13. Construcţia dreptei parametrice pentru un caz oarecare.

Dacă rădăcinile complexe $\underline{q}'$ şi $\underline{q}''$ sînt egale, atunci cvadrica bicirculară generală devine *melcul lui Pascal*.

3.6. CUADRIPOLI PASIVI

Bornele de intrare şi ieşire ale fiecărui cuadripol (perechile de borne) sînt traversate de un acelaşi curent, dar în sens contrar (în unele cazuri poate fi necesar un transformator).



Cuadripolul se poate defini prin următoarele sisteme de ecuaţii (văzut dinspre perechea de borne 1):

Matricea impedanţelor

$$\underline{U}_1 = \underline{W}_{11}\underline{I}_1 + \underline{W}_{12}\underline{I}_2 \qquad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} \underline{W}_{11} & \underline{W}_{12} \\ \underline{W}_{21} & \underline{W}_{22} \end{pmatrix}.$$
$$\underline{U}_2 = \underline{W}_{12}\underline{I}_1 + \underline{W}_{22}\underline{I}_2$$

Matricea admitanţelor

$$\underline{I}_1 = \underline{Y}_{11}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{12}\underline{U}_2 \qquad \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{pmatrix}.$$
$$\underline{I}_2 = \underline{Y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{22}\underline{U}_2$$

Matricea serie-paralel:

$$\underline{U}_1 = \underline{H}_{11}\underline{I}_1 + \underline{H}_{12}\underline{U}_2 \qquad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \underline{H}_{11} & \underline{H}_{12} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{22} \end{pmatrix}.$$
$$\underline{I}_2 = \underline{H}_{21}\underline{I}_1 + \underline{H}_{22}\underline{U}_2$$

Matricea paralel-serie

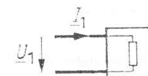
$$\underline{I}_1 = \underline{P}_{11}\underline{U}_1 + \underline{P}_{12}\underline{I}_2 \qquad \mathbf{P} = \begin{pmatrix} \underline{P}_{11} & \underline{P}_{12} \\ \underline{P}_{21} & \underline{P}_{22} \end{pmatrix}.$$
$$\underline{U}_2 = \underline{P}_{21}\underline{U}_1 + \underline{P}_{22}\underline{I}_2$$

Matricea lanţ

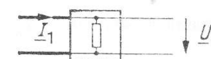
$$\underline{U}_1 = \underline{K}_{11}\underline{U}_2 + \underline{K}_{12}\underline{I}_2 \qquad \mathbf{K} = \begin{pmatrix} \underline{K}_{11} & \underline{K}_{12} \\ \underline{K}_{21} & \underline{K}_{22} \end{pmatrix}.$$
$$\underline{I}_1 = \underline{K}_{21}\underline{U}_2 + \underline{K}_{22}\underline{I}_2$$

Semnificaţia fizică şi stabilirea elementelor matricei raportată la perechea de borne 1

$\underline{I}_2 = 0$ $\quad \underline{W}_{11} = \dfrac{1}{\underline{P}_{11}} = \underline{W}_{1l} = \dfrac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}$ impedanţa la mers în gol



$\underline{W}_{21} = \dfrac{1}{\underline{K}_{21}} = \underline{W}_{1m} = \dfrac{\underline{U}_2}{\underline{I}_1}$ impedanţa de transfer la mers în gol



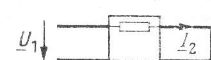
$\underline{K}_{11} = \dfrac{1}{\underline{P}_{21}} = \underline{ü}_{1U} = \dfrac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}$ raportul tensiunilor la mersul în gol



$\underline{U}_2 = 0$ $\quad \underline{Y}_{11} = \dfrac{1}{\underline{H}_{11}} = \underline{Y}_{1k} = \dfrac{\underline{I}_1}{\underline{U}_1}$ admitanţa de scurtcircuit



$\underline{Y}_{21} = \dfrac{1}{\underline{K}_{12}} = \underline{Y}_{1m} = \dfrac{\underline{I}_2}{\underline{U}_1}$ admitanţa de transfer de scurtcircuit



$\underline{K}_{22} = \dfrac{1}{\underline{H}_{21}} = \underline{ü}_{1I} = \dfrac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2}$ raportul curenţilor de scurtcircuit



Celelalte elemente se obţin în mod analog pentru $\underline{I}_1 = 0$, respectiv $\underline{U}_1 = 0$.

Tabelul 3.15. **Relaţii pentru obţinerea cuadripolului echivalent al mai multor cuadripoli**

	Montaj în serie	Montaj în paralel	Montaj în cascadă	Montaj serie-paralel	Montaj serie-paralel
Conexiune	W_1, W_2	Y_1, Y_2	K_1, K_2	H_1, H_2	P_1, P_2
Cuadripol echivalent	W	Y	K	H	P
Matrice rezultată	$W = W_1 + W_2$	$Y = Y_1 + Y_2$	$K = K_1 \cdot K_2$	$H = H_1 + H_2$	$P = P_1 + P_2$

Tabelul 3.16. **Parametri ai unor cuadripoli simetrici importanţi**

	Circuit în T	Circuit în Π	Circuit în X
	$\underline{Z}_r$, $\underline{Z}_r$, $\underline{Z}_p$	$\underline{Z}_r$, $\underline{Z}_p$, $\underline{Z}_p$	$\underline{Z}_r$, $\underline{Z}_p$, $\underline{Z}_p$, $\underline{Z}_r$
Impedanţa la mers în gol $\underline{W}_1$	$\underline{Z}_r + \underline{Z}_p$	$\frac{\underline{Z}_p(\underline{Z}_r + \underline{Z}_p)}{\underline{Z}_r + 2\underline{Z}_p}$	$\frac{1}{2}(\underline{Z}_r + \underline{Z}_p)$
Admitanţa de scurtcircuit $\underline{Y}_k$	$\frac{(\underline{Z}_r + \underline{Z}_p)}{\underline{Z}_r(\underline{Z}_r + 2\underline{Z}_p)}$	$\frac{1}{\underline{Z}_r} + \frac{1}{\underline{Z}_p}$	$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\underline{Z}_r} + \frac{1}{\underline{Z}_p}\right)$
Impedanţa de transfer la mers în gol .... $\underline{W}_m$	$\underline{Z}_p$	$\frac{\underline{Z}_p^2}{\underline{Z}_r + 2\underline{Z}_p}$	$\frac{1}{2}(\underline{Z}_p - \underline{Z}_r)$
Admitanţa de transfer la scurtcircuit .... $\underline{Y}_m$	$\frac{\underline{Z}_p}{\underline{Z}_r(\underline{Z}_r + 2\underline{Z}_p)}$	$\frac{1}{\underline{Z}_r}$	$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\underline{Z}_r} - \frac{1}{\underline{Z}_p}\right)$
Raportul tensiunilor la mers în gol, ... $\ddot{u}U$ şi al curenţilor de scurtcircuit .... $\ddot{u}I$	$1 + \frac{\underline{Z}_r}{\underline{Z}_p}$	$1 + \frac{\underline{Z}_r}{\underline{Z}_p}$	$\frac{\underline{Z}_p + \underline{Z}_r}{\underline{Z}_p - \underline{Z}_r}$
Impedanţa caracteristică .. $\underline{Z}$	$\sqrt{\underline{Z}_r(\underline{Z}_r + 2\underline{Z}_p)}$	$\underline{Z}_p \cdot \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{\underline{Z}_r + 2\underline{Z}_p}}$	$\sqrt{\underline{Z}_r\underline{Z}_p}$

Pentru caudripolul simetric sistemul de ecuaţii devine:

$$\underline{U}_1 = \underline{K}_{11}\underline{U}_2 + \underline{K}_{12}\underline{I}_2 = \text{ch } \underline{g} \times \underline{U}_2 + \underline{Z} \text{ sh } \underline{g} \times \underline{I}_2$$

unde
$$\text{ch}\,\underline{g} = \underline{K}_{11} = \underline{K}_{22},$$

$$\underline{I}_2 = \underline{K}_{21}\underline{U}_2 + \underline{K}_{22}\underline{I}_2 = \text{ch}\,\underline{g} \times \underline{I}_2 + \frac{1}{\underline{Z}} \text{ sh } \underline{g} \times \underline{U}_2$$

unde
$$\underline{Z}\,\text{sh}\,\underline{g} = \underline{K}_{12}; \quad \frac{1}{\underline{Z}} \text{ sh } \underline{g} = \underline{K}_{21}.$$

Pentru cazul particular a n cuadripoli simetrici conectaţi unul după altul în lanţ rezultă:

$$\underline{U}_1 = \text{ch } \underline{g} \cdot n \cdot \underline{U}_2 + \underline{Z} \text{ sh } \underline{g} \cdot n \cdot \underline{I}_2;$$

$$\underline{I}_1 = \text{ch } \underline{g} \cdot n \cdot \underline{I}_2 + \frac{1}{\underline{Z}} \text{ sh}\,\underline{g} \cdot n \cdot \underline{U}_2.$$

Pentru montarea în serie a unui număr infinit de mici cuadripoli identici (circuite în T sau Π) se obţin cu $g \times n \to \gamma \times l$ ecuaţiile de linie, unde cu $\underline{Z}_p \gg \underline{Z}_r$ se aplică impedanţele caracteristice

$$\underline{Z} \to \sqrt{2\underline{Z}_r\underline{Z}_p} \text{ (circuit T) şi } \underline{Z} \to \sqrt{\frac{\underline{Z}_r}{2\underline{Z}_p}} \text{ (circuit Π).}$$

3.7. PARAMETRII UNEI LINII OMOGENE

Valorile pe unitatea de lungime (în afară de $\underline{Z}$ şi v):

rezistenţa specifică $R' = \frac{R}{l}$; conductanţa specifică $G' = \frac{G}{l}$;

inductivitatea specifică $L' = \frac{L}{l}$; capacitatea specifică $C' = \frac{C}{l}$;

impedanţa longitudinală $R' + j\omega L'$; admitanţa transversală $G' + j\omega C'$

Impedanţa caracteristică:

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}\sqrt{\frac{1 + \frac{R}{j\omega L}}{1 + \frac{G}{j\omega L}}}.$$

Constanta de propagare a liniei:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' +)\omega C j'} = j\omega\sqrt{L'C'}\sqrt{\left(1 + \frac{R'}{j\omega L'}\right)\left(1 + \frac{G'}{j\omega C'}\right)}$$

unde: α este constanta de atenuare;
β — constanta de fază sau de lungime de undă

Viteza de propagare a fazei

$$v = \frac{\omega}{\beta}.$$

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \text{ (cazurile 1 ... 4 din tabelul 3.17)}; \ v \approx \sqrt{\frac{2\omega}{C'R'}} \text{ (cazul 5)}.$$

Tabelul 3.17. **Impedanța caracteristică și constanta de propagare**

Cazul	Atenuarea	Impedanța caracteristică Z	Constanta de propagare $\gamma = \alpha + j\beta$	α	β
1	$R \ll \omega L$ $G \ll \omega C$	$\sqrt{\frac{L}{C}}\left[1 - \frac{j}{2}\left(\frac{R}{\omega L} - \frac{G}{\omega C}\right)\right]$	$j\omega\sqrt{L'C'}\left[1 - \frac{j}{2}\left(\frac{R'}{\omega L'} + \frac{G'}{\omega C'}\right)\right]$	$\frac{1}{2}\left(\frac{R'}{\sqrt{L'/C'}} + G'\sqrt{\frac{L'}{C'}}\right)$	$\omega\sqrt{L'C'}$
2	$R \ll \omega L$ $G = 0$	$\sqrt{\frac{L}{C}}\left(1 - \frac{j}{2}\frac{R}{\omega L}\right)$	$j\omega\sqrt{L'C'}\left(1 - \frac{j}{2}\frac{R'}{\omega L'}\right)$	$\frac{1}{2}\frac{R'}{\sqrt{L'/C'}}$	$\omega\sqrt{L'C'}$
3	$R = 0$ $G = 0$	$\sqrt{\frac{L}{C}}$	$j\omega\sqrt{L'C'}$	0	$\omega\sqrt{L'C'}$
4	$\frac{R}{\omega L} = \frac{G}{\omega C}$	$\sqrt{\frac{L}{C}}$	$j\omega\sqrt{L'C'}\left(1 + \frac{R'}{j\omega L'}\right)$	$\frac{R'}{\sqrt{L'/C'}}$	$\omega\sqrt{L'C'}$
5	$R \gg \omega L$ $G = 0$	$\sqrt{\frac{R}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{R}{\omega C}}\, e^{-j\frac{\pi}{4}}$	$\sqrt{j\omega C'R} = \sqrt{\omega C'R'}\, e^{j\frac{\pi}{4}}$	$\sqrt{\frac{\omega C'R'}{2}}$	$\sqrt{\frac{\omega C'R'}{2}}$

Notă. 3 și 4 — cazuri speciale; 1,2 și 5 — valori aproximative.

Se utilizează:

1 și 2 (linii cu pierderi mici): pentru linii obișnuite de înaltă tensiune, linii de înaltă frecvență;

3 (linii fără pierderi): pentrn aproximarea comportării transportului pe linii de înaltă și foarte înaltă tensiune;

4 (linii fără distorsiune): pentru telecomunicații;

5 pentru linii aeriene și în special cabluri cu secțiune mică și/sau la frecvență joasă.

Pentru o linie de lungime l sînt valabile următoarele valori ($f = \omega/2\pi$ este frecvența transmisiei):

constanta de transmisie: $\underline{g} = \gamma l$

constanta de atenuare: $a = \alpha l$,

lungimea de undă: $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v}{f}$,

constanta de fază: $b = \beta l$;

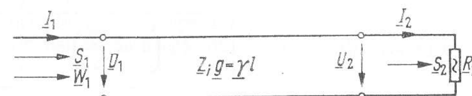
perioada: $t_{ph} = \frac{b}{\omega} = \frac{\beta l}{\omega} = \frac{l}{v}$.

Ecuațiile de linie

Pentru o linie de lungime arbitrară sînt valabile, în general, următoarele relații:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{g} + \underline{I}_2 \underline{Z} \operatorname{sh} \underline{g}, \qquad \underline{U}_2 = \underline{U}_1 \operatorname{ch} \underline{g} - \underline{I}_1 \underline{Z} \operatorname{sh} \underline{g},$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{g} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}} \operatorname{sh} \underline{g}. \qquad \underline{I}_2 = \underline{I}_1 \operatorname{ch} \underline{g} - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}} \operatorname{sh} \underline{g}.$$



Parametrii liniei sînt:

impedanța de intrare: $\underline{W}_1 = \underline{U}_1/\underline{I}_1$;

puterea aparentă de intrare: $\underline{S}_1 = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^*$;

impedanța de sarcină: $\underline{R}_2 = \underline{U}_2/\underline{I}_2$

puterea aparentă debitată: $\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^*$.

Cînd linia funcționează în gol se admite:

$$\underline{R}_2 = \infty, \quad \underline{I}_2 = 0;$$

la scurtcircuit:

$$\underline{R}_2 = 0; \quad \underline{U}_2 = 0$$

cînd linia este închisă pe o impedanță $\underline{Z}$:

$\underline{R}_2 = \underline{Z}$ (transmiterea puterii nominale).

În plus, impedanța de intrare a unei linii scurte cu pierderi reduse ($R \ll \omega L$; $G \ll \omega C$) este, pentru linia în gol: $\underline{W}_1 \approx \frac{1}{G + j\omega C}$ ($\underline{R}_2 = \infty$; $\underline{I}_2 = 0$);

linia în regim de scurtcircuit: $\underline{W}_1 \approx R + j\omega L$; ($\underline{R}_2 = 0$; $\underline{U}_2 = 0$).

La frecvența de funcționare de 50 sau 60 Hz liniile cu lungimi pînă la 200 km pot fi considerate întotdeauna ca linii scurte, iar cele de 200 pînă la 400 km pot fi considerate scurte numai pentru calcule aproximative.

Ecuațiile generale se simplifică pentru cazurile din tab. 3.18.

Tabelul 3.18. **Ecuaţii de linie (cazuri speciale)**

		Linie fără pierderi $R=0;\ G=0$	Linie scurtă $\underline{g} \ll 1$	Linie scurtă fără pierderi $R=0;\ G=0;\ \underline{g} \ll 1$
$\underline{R}_2$ oarecare	$\underline{U}_1$	$\underline{U}_2 \cos \omega \sqrt{LC} + j\underline{I}_2 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega \sqrt{LC}$	$\underline{U}_2\left(1+\frac{\underline{g}^2}{2}\right) + \underline{I}_2\underline{Z}\,\underline{g}$	$\underline{U}_2\left(1-\frac{\omega^2 LC}{2}\right) + \underline{I}_2 j\omega L$
	$\underline{I}_1$	$\underline{I}_2 \cos \omega \sqrt{LC} + j\frac{\underline{U}_2}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \sin \omega \sqrt{LC}$	$\underline{I}_2\left(1+\frac{\underline{g}^2}{2}\right) + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}}\underline{g}$	$\underline{I}_2\left(1-\frac{\omega^2 LC}{2}\right) + \underline{U}_2 j\omega C$
	$\underline{W}_1$	$\underline{R}_2 \frac{1 + j\frac{\sqrt{L/C}}{\underline{R}_2} \operatorname{tg} \omega \sqrt{LC}}{1 + j\frac{\underline{R}_2}{\sqrt{L/C}} \operatorname{tg} \omega \sqrt{LC}}$	$\underline{R}_2\left[1+\left(\frac{\underline{Z}}{\underline{R}_2}-\frac{\underline{R}_2}{\underline{Z}}\right)\cdot \underline{g}\right]$	$\underline{R}_2\left[1+j\left(\frac{\omega L}{\underline{R}_2}-\omega C\underline{R}_2\right)\right]$
$\underline{R}_2 = \infty$	$\underline{U}_1$	$\underline{U}_2 \cos \omega \sqrt{LC}$	$\underline{U}_2\left(1+\frac{\underline{g}^2}{2}\right)$	$\underline{U}_2\left(1-\frac{\omega^2 LC}{2}\right)$
	$\underline{I}_1$	$j\frac{\underline{U}_2}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \sin \omega \sqrt{LC}$	$\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}}\cdot \underline{g}$	$\underline{U}_2 j\omega C$
	$\underline{W}_1$	$-j\sqrt{\frac{L}{C}} \operatorname{cotg} \omega \sqrt{LC}$	$\frac{\underline{Z}}{\underline{g}}$	$\frac{1}{j\omega C}$
$\underline{R}_2 = 0$	$\underline{U}_1$	$j\underline{I}_2 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega \sqrt{LC}$	$\underline{I}_2\underline{Z}\,\underline{g}$	$\underline{I}_2 j\omega L$
	$\underline{I}_1$	$\underline{I}_2 \cos \omega \sqrt{LC}$	$\underline{I}_2\left(1+\frac{\underline{g}^2}{2}\right)$	$\underline{I}_2\left(1-\frac{\omega^2 LC}{2}\right)$
	$\underline{W}_1$	$j\sqrt{\frac{L}{C}} \operatorname{tg} \omega \sqrt{LC}$	$\underline{Z}\cdot \underline{g}$	$j\omega L$
$\underline{R}_2 = \underline{Z}$	$\underline{U}_1$	$\underline{U}_2 e^{g}$	$\underline{U}_2(1+\underline{g})$	$\underline{U}_2(1+j\omega\sqrt{LC})$
	$\underline{I}_1$	$\underline{I}_2 e^{g}$	$\underline{I}_2(1+\underline{g})$	$\underline{I}_2(1+j\omega\sqrt{LC})$
	$\underline{W}_1$	$\underline{Z}$	$\underline{Z}$	$\underline{Z}=\sqrt{\frac{L}{C}}$

3.8. SISTEME DE COMPONENTE

Sistemele de componente servesc în reţele polifazate cu încărcări asimetrice sau cu defecte urmate de deconectări electrice şi magnetice ale porţiunii simetrice a reţelei. Aceasta constă în reducerea numărului de ecuaţii (ochiuri, noduri) necesare pentru calculul reţelei şi a numărului de elemente de modelare (ramuri) necesare reprezentării analitice a reţelei. Semnificaţia fizică a componentelor individuale (de ex. componentele directe şi inverse — respectiv componentele longitudinale şi transversale la maşinile electrice) uşurează interpretarea corelaţiilor fizice şi luarea în consideraţie a unor caracteristici speciale. Sistemele de componente sînt aplicabile, în principiu, la reţele polifazate cu număr arbitrar de faze cît şi pentru orice frecvenţă, inclusiv frecvenţa de lucru, adică şi pentru curent continuu, armonice superioare şi fenomene tranzitorii.

Pentru reţelele trifazate se disting următoarele sisteme de componente:

Sistemul de componente	*Notaţia prescurtată*
componente $\alpha\beta 0$ (după E. Clarke)	$\alpha\beta 0$
componente simetrice (după C. L. Fortescue)	120
componente dq0 (după R. H. Park)	dq0

Principalele domenii de aplicaţie ale sistemelor de componente:

$\alpha\beta 0$ — fenomene electromagnetice tranzitorii de frecvenţă ridicată (de ex. supratensiuni de comutaţie), cît şi fenomene supratranzitorii (de ex. curenţi de scurtcircuit de şoc) în special în cazul perturbaţiilor multiple;

120 — curenţi şi tensiuni de frecvenţă normală ţinînd seama de comportarea maşinilor rotative (de ex. pentru diferite impedanţe directe şi inverse ale generatoarelor);

dq0 — fenomene în maşini electrice.

Relaţiile dintre tensiunile — respectiv curenţii — în diferitele sisteme de componente sînt date de matricea de transformare (tabelul 3.19).

De exemplu matricea de transformare $T_{RST-\alpha\beta 0}$ pentru curenţi şi tensiuni se obţine din coloanele $\boxed{\begin{matrix}0\ \alpha\ \beta\\ \cdot\ \cdot\ \cdot\end{matrix}}$ şi liniile $\boxed{\begin{matrix}R & \cdot\\ S & \cdot\\ T & \cdot\end{matrix}}$ şi cu ajutorul e se obţin următoarele relaţii:

$$T_{REST-\alpha\beta 0} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_R &= \underline{U}_0 + \underline{U}_\alpha \\ \underline{U}_S &= \underline{U}_0 - \frac{1}{2}\underline{U}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{U}_\beta \qquad (3.32) \\ \underline{U}_T &= \underline{U}_0 - \frac{1}{2}\underline{U}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{U}_\beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= \underline{I}_0 + \underline{I}_\alpha \\ \underline{I}_S &= \underline{I}_0 - \frac{1}{2}\underline{I}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{I}_\beta \qquad (3.33) \\ \underline{I}_T &= \underline{I}_0 - \frac{1}{2}\underline{I}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{I}_\beta\,. \end{aligned}$$

Din matricele diagonale pentru RST și 0αβ (diagonala principală din tabelul 3.19) se obține ca o condiție pentru invarianța puterii complexe:

$$\underline{P}_{RST} = 1\cdot \underline{U}_R\underline{I}_R^* + 1\cdot \underline{U}_S\underline{I}_S^* + 1.\underline{U}_T\underline{I}_T^*$$
$$= \underline{P}_{\alpha\beta0} = 3\cdot \underline{U}_0\underline{I}_0^* + \frac{3}{2}\cdot \underline{U}_\alpha\underline{I}_\alpha^* + \frac{3}{2}\cdot \underline{U}_\beta\underline{I}_\beta^*. \qquad (3.34)$$

În plus mai este valabil:

$$\underline{U}_R = \underline{E}_R - \underline{I}_R\underline{Z}_R;\quad \underline{U}_S = \underline{E}_S - \underline{I}_S\underline{Z}_S;\quad \underline{U}_T = \underline{E}_T - \underline{I}_T\underline{Z}_T;$$
$$\underline{U}_0 = \underline{E}_0 - \underline{I}_0\underline{Z}_0;\quad \underline{U}_\alpha = \underline{E}_\alpha - \underline{I}_\alpha\underline{Z}_\alpha;\quad \underline{U}_\beta = \underline{E}_\beta - \underline{I}_\beta\underline{Z}_\beta. \qquad (3.35)$$

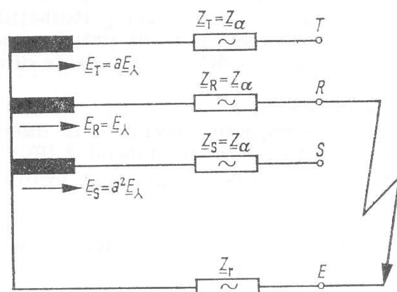
Relații analoge sînt valabile pentru toate celelalte transformări.

Exemplu: Reprezentarea unui scurtcircuit monofazat în componente αβ0.

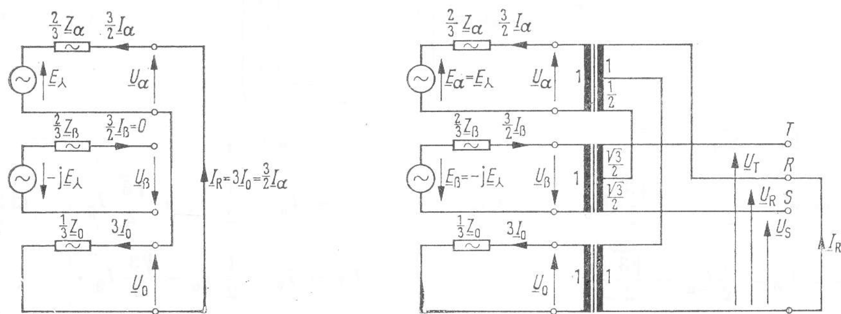
Din ecuațiile (3.32) și (3.33) se obține pentru locul defectului:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_0 + \underline{U}_\alpha = 0 \rightarrow \underline{U}_0 = -\underline{U}_\alpha$$

$$\left.\begin{aligned} \underline{I}_S &= \underline{I}_0 - \frac{1}{2}\underline{I}_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{I}_\beta = 0 \\ \underline{I}_T &= \underline{I}_0 - \frac{1}{2}\underline{I}_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\underline{I}_\beta = 0 \end{aligned}\right\} \rightarrow \underline{I}_0 = \frac{1}{2}\underline{I}_\alpha = \frac{1}{3}\underline{I}_R,\quad \underline{I}_\beta = 0 \qquad (3.36)$$



Ținînd seama de relațiile (3.34), (3.35) și (3.36) rezultă următoarea schemă echivalentă:



În dreapta figurii de la p. 198 jos este reprezentată o schemă generală de transfer care satisface matricele de transformare T_{RST-0} și $T_{\alpha\beta0-RST}$, cît și ecuațiile (3.34) și (3.35). Schema echivalentă pentru un scurtcircuit monofazat (desenată gros) poate fi dedusă de aici.

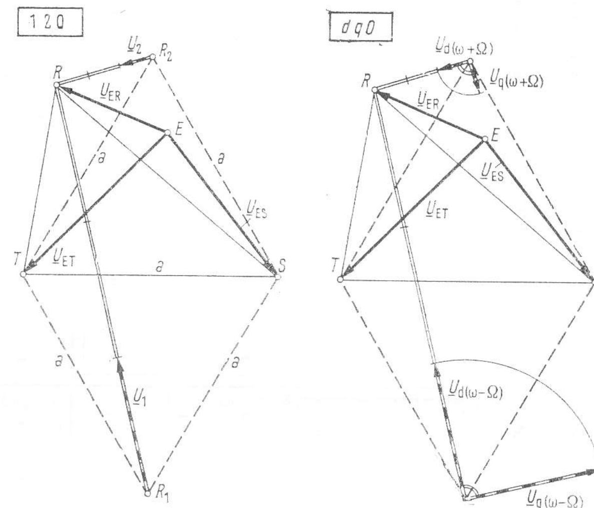


Fig. 3.14. Determinarea grafică a componentelor pentru un sistem asimetric de tensiuni în stea. Tensiunea punctului de nul se determină în toate cazurile ca pentru sistemul αβ0.
M — centrul de greutate al triunghiului RST; R_1ST și R_2ST — triunghiuri echilaterale construite pe $\overline{ST}$; ω — pulsația de funcționare; Ω — turația motorului; ω — Ω — pulsația de alunecare.

Conform ecuațiilor de transformare date un sistem de tensiune asimetricîn stea (steaua curenților) poate fi descompus în componentele sale (fig. 3.14) respectiv poate fi compus din componentele sale (fig. 3.15).

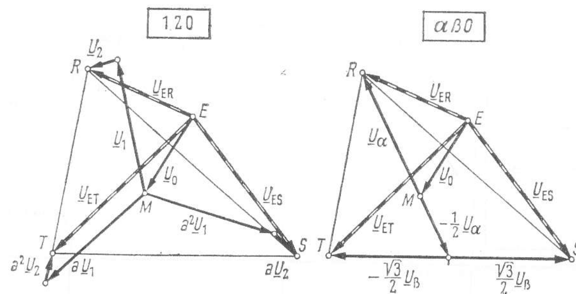


Fig. 3.15. Compunerea grafică a unui sistem asimetric de tensiuni în stea din componentele ei.

Tabelul 3.19. **Matricele de transformare pentru diferite sisteme de componente**

	R	S	T	0	1	2	0	α	β	0	d	q
R	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	$\cos \Omega t$	$-\sin \Omega t$
	0	1	0	1	a^2	a	1	$-\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\cos(\Omega t-120°)$	$-\sin(\Omega t-120°)$
T	0	0	1	1	a	a^2	1	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\cos(\Omega t+120°)$	$-\sin(\Omega t+120°)$
0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	3	0	0	1	0	0	1	0	0
1		$\frac{a}{3}$	$\frac{a^2}{3}$	0	3	0	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{j}{2}$	0	$\frac{1}{2}e^{j\Omega}$	$\frac{j}{2}e^{j\Omega}$
2	$\frac{\;}{3}$	$\frac{a^2}{3}$	$\frac{a}{3}$	0	0	3	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{j}{2}$	0	$\frac{1}{2}e^{-j\Omega t}$	$-\frac{j}{2}e^{-j\Omega t}$
0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	0	0	3	0	0	1	0	0
α	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	1	1	0	$\frac{3}{2}$	0	0	$\cos \Omega t$	$-\sin \Omega t$
β	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	0	$-j$	$+j$	0	0	$\frac{3}{2}$	0	$\sin \Omega t$	$\cos \Omega t$
	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	0	0	1	0	0	3	0	0
d	$\frac{2}{3}\cos \Omega t$	$\frac{2}{3}\cos(\Omega t-120°)$	$\frac{2}{3}\cos(\Omega t+120°)$	0	$e^{-j\Omega t}$	$e^{j\Omega t}$	0	$\cos \Omega t$	$\sin \Omega t$	0	$\frac{3}{2}$	0
q	$-\frac{2}{3}\sin \Omega t$	$-\frac{2}{3}\sin(\Omega t-120°)$	$-\frac{2}{3}\sin(\Omega t+120°)$	0	$-je^{-j\Omega t}$	$je^{j\Omega t}$	0	$-\sin \Omega t$	$\cos \Omega t$	0	0	$\frac{3}{2}$

4. MĂRIMI ELECTRICE ȘI MAGNETICE, (TERMINOLOGIE ȘI DEFINIȚII)

Admitanță

V. tabelul 4.2

Alunecare

Dreapta care pornește din origine, înclinată față de axa J (cu unghiul ϑ) și care este determinată de configurația unui circuit magnetic cu întrefier tg $\vartheta = N$. (v. fig. 4.1, 4.2 și „Factor de demagnetizare" pag. 213).

Capacitate

Capacitatea unui sistem de două conductoare încărcate cu sarcini egale și de semne contrare se definește ca

$$C = \frac{Q}{u}, \text{ unitatea: farad (F),}$$

unde Q este sarcina electrică a unui conductor, în C, iar u este valoarea tensiunii dintre acest conductor și celălalt, în V.

Relații între unități: $1F = \frac{1C}{1V}$; $1C = 1As$.

Capacitatea condensatorului plan

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d},$$

unde A este suprafața unei plăci, în m²;
d — distanța dintre plăci, în m;
ε_r și ε_0 — v. la „Permitivitate" (pag. 224).

Capacitatea condensatorului cilindric:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi h}{\ln \frac{r_e}{r_i}},$$

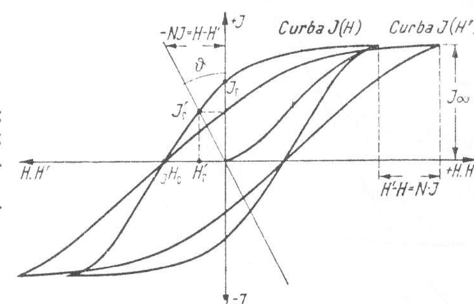


Fig. 4.1. Definiția alunecării și a factorului de demagnetizare $N = $ tg θ.

unde: h este înălţimea cilindrului, în m;
r_e — raza cilindrului exterior, în m;
r_i — raza cilindrului interior, în m.

Cîmp coercitiv

Cîmpul magnetic coercitiv (intensitatea cîmpului coercitiv de polarizaţie magnetică) $_JH_c$ corespunde punctului de intersecţie al ciclului $J(H)$ cu axa H. Cîmpul coercitiv real (intensitatea reală a cîmpului coercitiv de inducţie magnetică) $_BH_c$ corespunde punctului de intersecţie al ciclului $B(H)$ cu axa H.

Cîmpul coercitiv aparent $_BH'_c$ corespunde punctului de intersecţie al ciclului $B(H')$ cu axa H, H' fiind cîmpul exterior (v. factorul de demagnetizare N).

$$_BH'_c = {_BH_c}(1 - N),$$

unde: $_BH_c$ este cîmpul coercitiv pentru o magnetizare ciclică simetrică, precum şi pentru ciclul incomplet;
$_JH_c$ — cîmpul coercitiv intrinsec H_{ci}, pentru $B_i = 0$ (adică pentru $J = 0$).

Valoarea limită pentru cicluri complete corespunzătoare magnetizării pînă la saturaţie) se numeşte *coercitivitate*.

Cîmp electric

Între electrozii unui condensator încărcaţi cu sarcină electrică Q, există un cîmp electric.

Un mic corp conductor, avînd sarcina electrică Q^*, introdus în acest cîmp, este supus unei forţe F(exprimată în mkg/s²), care în general variază ca valoare şi direcţie de la punct la punct. Intensitatea cîmpului electric în punctul în care se află micul corp este definită prin

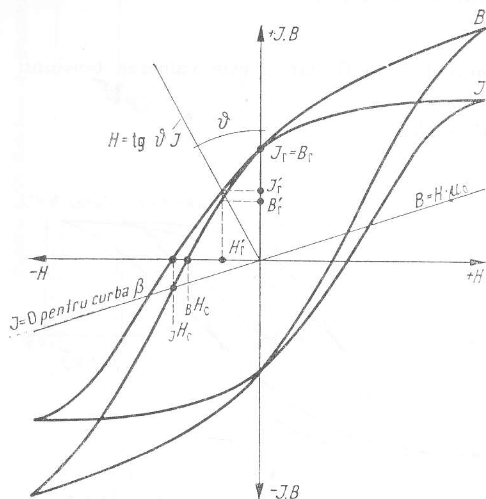


Fig. 4.2. Ciclul de histerezis reprezentat ca $B(H)$ şi $J(H)$.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q^*}, \text{ unitatea: } V/\text{m}.$$

Sensul acestui vector **E** este acelaşi cu al forţei **F** atunci cînd Q^* este o sarcină pozitivă.

Relaţii între unităţi:
1 mkg /s² = 1 VAs/m şi 1C = 1As.

Relaţia care exprimă cîmpul din condensator este dată de

$$E = \frac{dU}{dx} \text{ pe direcţia } x.$$

Pentru cîmpul electric omogen dintre plăcile unui condensator plan

$$E = \frac{U}{d},$$

unde: U este tensiunea, în V;
d — distanţa dintre plăci, în m.

Cîmp exterior (magnetic)

Valoarea cîmpului de dispersie H_L al unui corp magnetizat (feromagnetic) sau al unei bobine prin care circulă un curent, într-un anumit punct din spaţiu în exteriorul corpului, care poate fi obţinută măsurînd inducţia magnetică în aer $B_L = H_L/\mu_0$ (μ_0 este permeabilitatea vidului).

Cîmp magnetic

Prin integrare pe un contur închis (v. „Tensiunea magnetomotoare" p. 233), obţinem

$$\oint \mathbf{H}\, d\mathbf{l} = F_m.$$

Pentru **H** constant şi omoparalel cu d**l** se obţine $Hl = F_m$, de unde

$$H = \frac{U_m}{l} = \frac{F_m}{l}.$$

Dacă se măsoară F_m în A obţinem

$$H = \frac{wi}{l},$$

unde: F_m este tensiunea magnetomotoare, în A;
U_m — tensiune magnetică, în Oe cm;
l — lungimea conturului, în cm;
i — curentul, în A;
w — numărul de spire.

Relaţii între unităţi:

$$1\text{Oe} = \frac{1\,\text{Gb(gilbert)}}{\text{cm}} = \frac{1}{0{,}4\pi}\cdot\frac{\text{A}}{\text{cm}};$$

$$1\frac{\text{A}}{\text{m}} = 4\pi\text{mOe} = 4\pi 10^{-3}\frac{\text{Gb}}{\text{cm}}.$$

Intensitatea cîmpului magnetic interior H: componenta tangenţială a cîmpului magnetic măsurată la suprafaţa materialului magnetic (în circuite magnetice deschise şi închise).

Intensitatea cîmpului magnetic exterior
$H' = wi/l$. Într-un circuit complet închis avem

$$H' = H.$$

Intensitatea cîmpului magnetic indus H_e în cazul magneţilor permanenţi (valabilă numai pentru schimbări de stare reversibile)

$$H_e = \frac{B}{\mu_\Delta} - H = \frac{J_p}{\mu_\Delta}, \quad \text{unitatea: A/cm},$$

unde: B este inducţia magnetică, în Vs/cm²;

μ_Δ este permeabilitatea incrementală, în H/cm;
J_p — polarizaţia magnetică, în Vs/cm²;
H — intensitatea cîmpului magnetic, în A/cm.

Intensitatea H_e a cîmpului magnetic indus este numai un parametru pentru calcul şi nu poate fi măsurată direct.

Coeficientul de pierderi

(cifra de pierderi) este pierderea (exprimată în W/kg) produsă într-o epruvetă cu masa de 1kg prin histerezis şi curenţi turbionari pentru o anumită inducţie magnetică maximă (exprimată în kGs), inducţia magnetică avînd o variaţie sinusoidală şi o frecvenţă de 50 Hz.

Exemplu: V_{10} înseamnă pierderile la 10 kGs.

Coeficient de scăpări

$$\nu = \frac{\Phi_T}{\Phi_L}; \quad \sigma = \frac{\Phi_T - \Phi_L}{\Phi_T} = 1 - \frac{1}{\nu} \text{ (scăparea specifică)},$$

unde:

Φ_T este cel mai mare flux magnetic din secţiunea transversală neutră;
Φ_L — fluxul util în întrefier.

Conductanţa

V. tabelul 4.2

Constanta dielectrică

V. „Permitivitatea" p. 224.

Curba de comutaţie

Curba de comutaţie statică: curba de magnetizare obţinută folosind curentul continuu: corespunde aproximativ cu curba de magnetizare normală (v. pag. 208).

Curba de comutaţie dinamică: curba de magnetizare ridicată cu ajutorul curentului alternativ (B_{max}, H_{max}); în cazul unor pierderi mici provocate de curenţii turbionari curbele de curent alternativ prezintă maxime prin a căror unire se formează curba de comutaţie dinamică. Ea corespunde practic curbei de comutaţie de curent continuu (fig. 4.20, pag. 211) în special la inducţii mijlocii sau mari. În cazul unor pierderi prin histerezis mari, extremităţile ciclurilor de curent alternativ sînt rotunjite (formă eliptică), atunci cînd există un defazaj între B_{max} şi H_{max} şi nu există nici o corespondenţă cu curba de curent continuu (fig. 4.3, pag. 205). Aceasta se întîmplă numai în cazul unor valori ale lui B şi H care corespund în timp, adică atunci cînd curba de curent alternativ este definită de valorile B_{max}, H pentru B_{max} (fig. 4.3, pag. 205), în care curba de curent continuu trece prin valorile maxime ale inducţiei magnetice ale ciclurilor în curent alternativ).

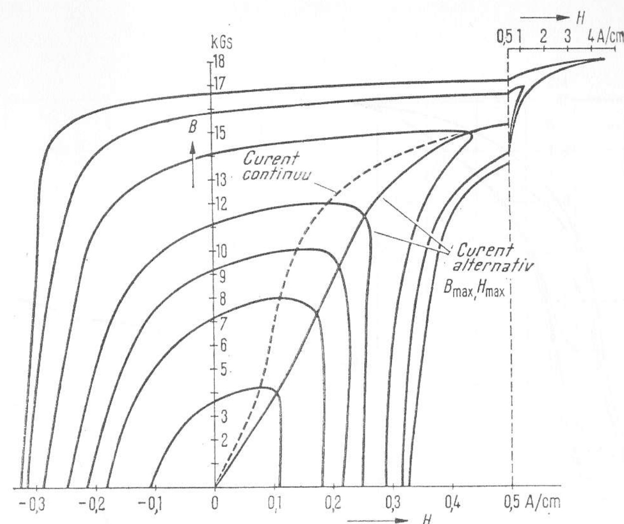


Fig. 4.3. Ciclul de histerezis în curent alternativ şi curbele de magnetizare pentru curent continuu şi curent alternativ (B_{max}, H_{max}) ale tablei de oţel „Orientat M7X", măsurată într-un patrat Epstein cu latura de 50 cm. Măsurarea cîmpului se face cu un voltmetru magnetoelectric, bobinajul de magnetizare este aşezat direct pe epruvetă; lungimea ariei de măsurare este 31mm. Măsurările în curent alternativ sînt efectuate cu ferometrul; măsurările în curent continuu sînt efectuate cu galvanometrul balistic; măsurările au fost efectuate de Siemens AG.

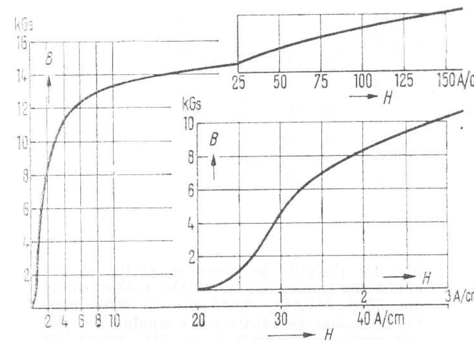


Fig. 4.4. Curba de comutaţie în curent continuu a miezurilor perforate confecţionate din tablă de transformator III, 0,5 mm; măsurare balistică a cîmpului de curent continuu.

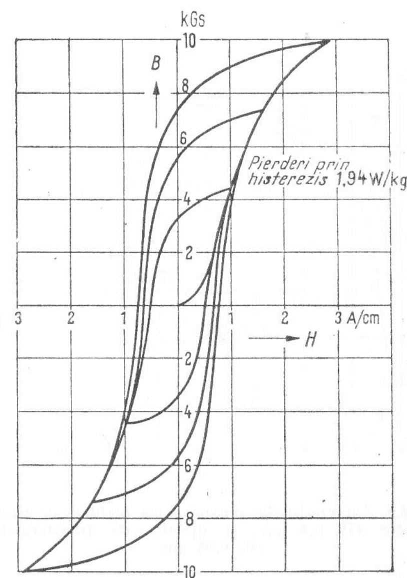


Fig. 4.5. Ciclul de histerezis în curent continuu şi curba de comutaţie a inelelor perforate confecţionate din tablă de transformator III 0,5 mm.

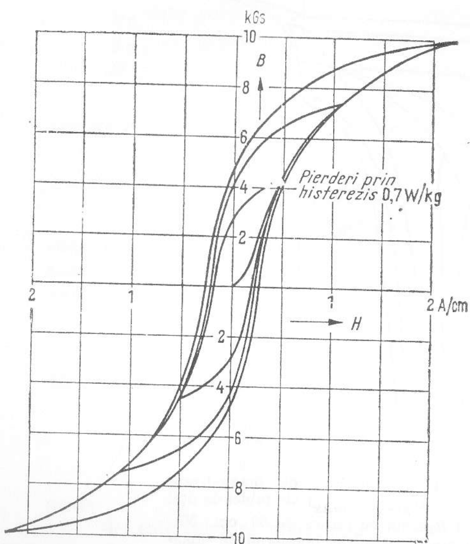


Fig. 4.6. Ciclul de histerezis în curent continuu și curba de comutație a inelelor perforate confecționate din tablă de oțel de transformator IV, 0,35 mm; măsurare balistică a cîmpului de curent continuu.

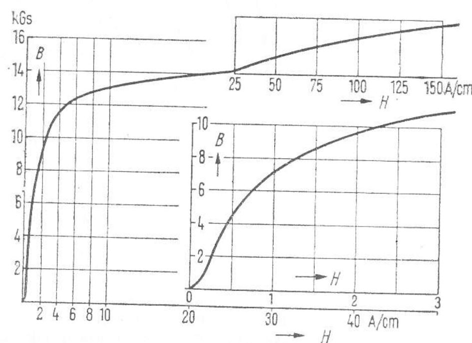


Fig. 4.7. Curba de comutație în curent continuu a miezurilor perforate confecționate din tablă de oțel pentru transformator IV, 0,35 mm, măsurare balistică a cîmpului de curent continuu.

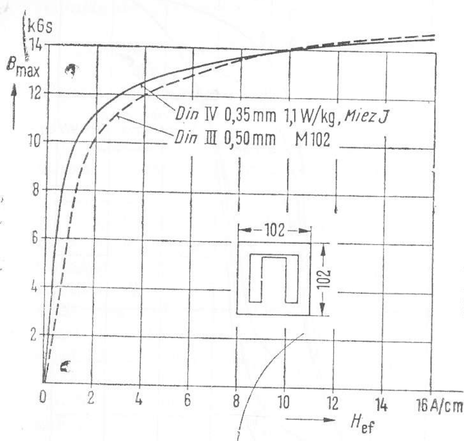


Fig. 4.8. Caracteristicile dinamice ale oțelului de transformator III, 0,5 mm, și oțelului de transformator IV, 0,35 mm.

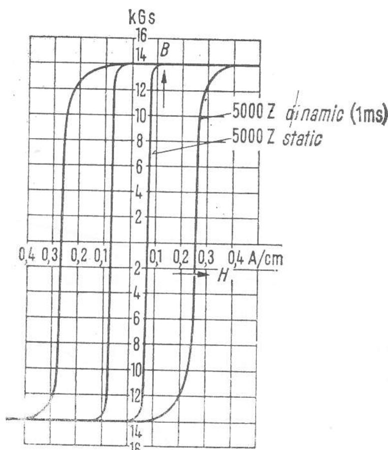


Fig. 4.9. Ciclurile de histerezis static și dinamic ale miezurilor toroidale confecționate din 5000 Z(VAC), 0,015 mm și 0,03 mm. Static: măsurare balistică a cîmpului de curent continuu; dinamic : 50 Hz, viteza de histerezis 1 ms.

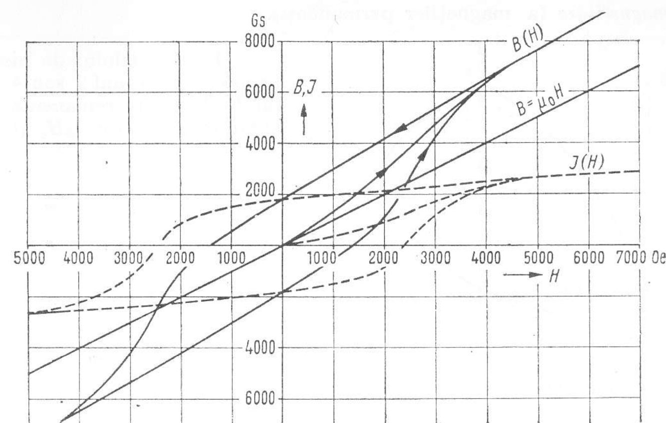


Fig. 4.10. Ciclul de histerezis reprezentat ca $B(H)$ și $J(H)$ al materialului FERROXDURE izotrop produs de Philips [1]) măsurat de Siemens AG.

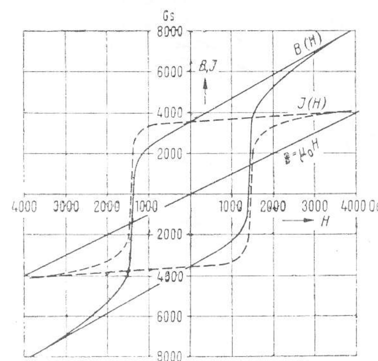


Fig. 4.11. Ciclul de histerezis reprezentat ca $B(H)$ și $J(H)$ al materialului FERROXDURE, anizotrop, produs de Philips [1]), măsurat de Siemens AG.

1) Philips: N. V. Philips Gloeilampenfabrieken Eindhoven.

Curba de demagnetizare (a magneţilor permanenţi).

Partea ciclului de histerezis cuprinsă în cadranul 2 sau 4 ale planului $B(H)$ dintre remanenţa (reală) B_r şi cîmpul coercitiv $_BH_c$ (fig. 4.12)

$$\operatorname{tg} \delta = \mu_{rev} = \mu_{\Delta}$$

$$= \frac{J_p}{H_c} = \frac{J_p - B}{H},$$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{B_a}{H_a \mu_0}.$$

Fig. 4.12. Curba de demagnetizare a magneţilor permanenţi.

Fig. 4.13. Curbele de demagnetizare ale materialelor standardizate pentru magneţi permanenţi.

Curba de magnetizare

V. „Curba de magnetizare normală".

Curba de magnetizare normală

Curba de magnetizare care porneşte din starea de nemagnetizare ($B = 0$, $J = 0$, $H = 0$). Aceasta se obţine magnetizînd un material magnetic printr-o creştere continuă (folosind o măsurare magnetometrică) sau în trepte (măsurare cu galvanometru balistic sau cu fluxmetru) a cîmpului magnetic de curent continuu.

Această curbă corespunde în mod aproximativ curbei de comutare în curent continuu.

Fig. 4.14. Curbele de magnetizare în curent continuu ale cîtorva materiale magnetic moi şi magnetic dure: *1* — Ultraperm 10 produs de VAC [1]), tor, măsurat de Siemens AG; *2* — MUMETALL produs de VAC, măsurat de VAC; *3* — PERMENORM 5 000 Z produs de VAC, tor, măsurat de VAC; *4* — VACOFLUX 50 produs de VAC, măsurat de VAC; *5* — M7X orientat, recopt, patrat Epstein, măsurat de Siemens AG; *6* — oţel electrotehnic turnat pentru dinam conform Stoffhütte 1941; *7* — tolă IV/0,9 patrat Epstein, măsurată de Siemens AG; *8* — oţel recopt conform cu Stoffhütte 1941; *9* — miez de pulbere sinterizată cu μ_{max} — 156 (Speed şi Elmen); *10* — oţel pentru magneţi CO 040, $H_c = 75$ Oe, $B_r = 9600$ Gs, măsurat de Siemens AG; *11* — oţel pentru magneţi Oerstit 400 K, anizotropic, produs de DEW [2]), măsurat de Siemens AG; *12* — magnet din oxid, anizotropic, produs de Philips[3]), măsurat de Siemens AG; *13* — magnet de oxid izotropic, produs de Philips, măsurat de Siemens AG; *14* — miez de ferită produs de Siemens AG.

Fig. 4.15. Curbele de magnetizare în curent alternativ ale cîtorva materiale magnetic moi B_{max} (H_{max}) *1* — ULTRAPERM 10 produs de VAC, tor, măsurat de VAC; *3* — PERMENORM 5000 Z produs de VAC, tor, măsurat de VAC; *4* — VACOFLUX 50 produs de VAC, măsurat de VAC; *5* — M7X orientat, recopt pătrat Epstein, măsurat de Siemens AG; *7* — tolă IV/0,9, 0,35 mm pătrat Epstein, măsurat de Siemens AG; *15* — tolă I/3,6; 0,5 mm măsurat de Siemens AG; *5* şi *7* — măsurări cu ferometrul într-un patrat Epstein cu latura de 50 cm. Măsurare cu voltmetru magnetic; bobinajul de magnetizare aşezat direct pe epruvetă; lungimea ariei de măsurare 31 mm, măsurat de Siemens AG.

[1]) VAC: Vacuumschmelze Aktiewgesellschaft, Hanau.
[2]) DEW — Deutsche Edelstahlwerke, Krefeld.
[3]) Philips: N. V. Philips Gloeilampenfabriken, Eindhoven

14 — Memoratorul inginerului electrician — c. 1794

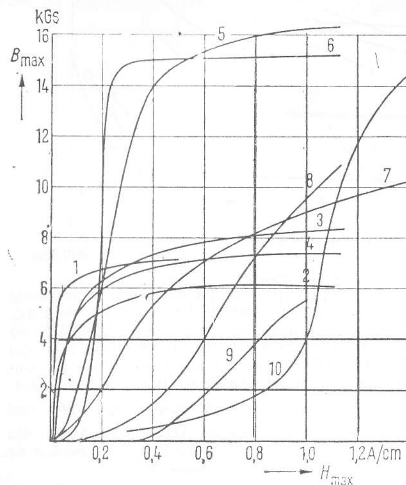


Fig. 4.16. Curbele de magnetizare în curent alternativ ale cîtorva materiale magnetic moi la intensități mici ale cîmpului: *1* — ULTRAPERM 10 produs de VAC [1]), tor, 0,05 pînă la 0,15 mm măsurat de VAC; *2* — M 1040, tor, 0,1... 0,35 mm măsurat de VAC; *3*— PERMALLOY C, tor, 0,1... 0,35 mm măsurat de VAC; *4* — MUMETALL, tor, 0,1...0,35 mm măsurat de VAC; *5*—TRAFOPERM N2 produs de VAC, tor, 0,1... 0,35 mm măsurat de VAC; *6* — PERMENORM 5000 Z produs de VAC, tor, 0,05... 0,75 mm, măsurat de VAC; *7*—tablă electrică VI/0,9 patrat Epstein, 0,35 mm, măsurat de Siemens AG; *8* — TRAFOPERM N 1 produs de VAC, tor 0,1... 0,35 mm, măsurat de VAC; *9* — tablă electrică I/3,6 patrat Epstein, 0,5 mm măsurat de Siemens AG; *10* — VACOFLUX 50 produs VAC, tor, 0,05...0,35 mm, măsurat de VAC.

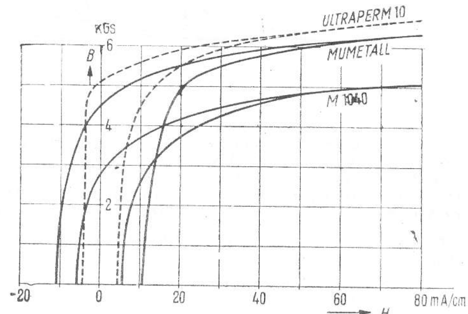


Fig. 4.17. Ciclul de histerezis în curent continuu al torurilor (0,05...0,35 mm) produs de VAC; măsurare efectuată de VAC.

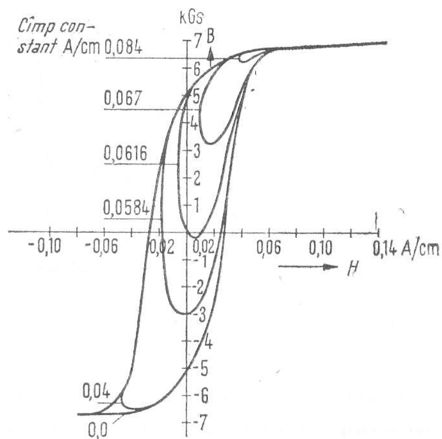


Fig. 4.18. Ciclul de histerezis cu interferență de cîmp de curent continuu pentru SUPERMALLOY; tor 0,05...0,35 mm, 60 Hz.

[1]) VAC — Vacumschmelze Aktiengesellschaft, Hanau

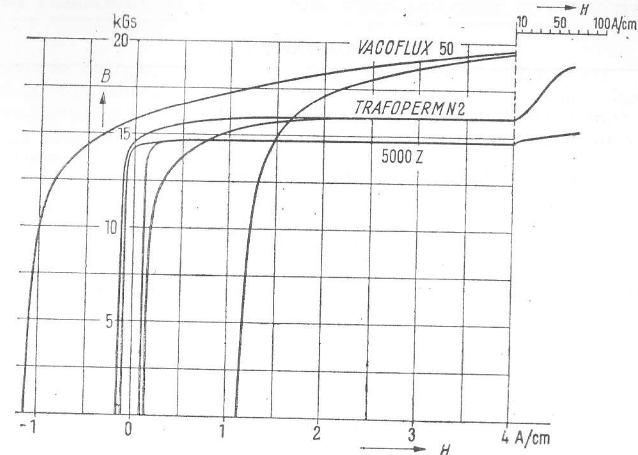


Fig. 4.19. Ciclul de histerezis în curent continuu al miezurilor toroidale (0,05...0,35 mm) produse de VAC; măsurare efectuată de VAC.

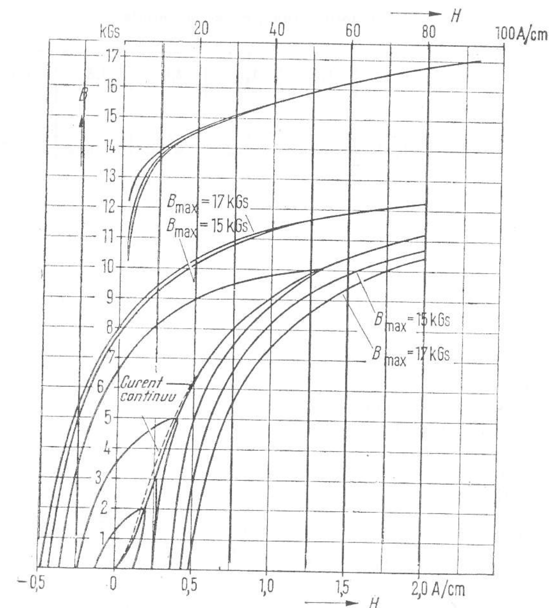


Fig. 4.20. Cicluri de histerezis de curent alternativ și curbele de magnetizare pentru curent continuu și alternativ (B_{max}, H_{max}) ale oțelului de transformator IV, 0,9 mm măsurate într-un pătrat Epstein cu latura de 50 cm, două teancuri paralele cu direcția de laminare, iar două teancuri perpendiculare pe această direcție. Măsurarea cîmpului a fost efectuată cu un voltmetru magnetic, iar bobinajul de magnetizare a fost așezat direct pe epruvetă; lungimea ariei de măsurare 31 mm. Măsurările în curent alternativ au fost efectuate cu ferometrul, iar cele în curent continuu cu galvanometrul balistic. Măsurarea efectuată de Siemens AG.

***Curenţi** tranzitorii (curenţi tranzitorii de comutare)*
pentru bobine de inducţie, de pildă bobine de excitaţie.

Curentul creşte la închiderea circuitului conform expresiei

$$i = I_0\left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right).$$

Curentul scade la deschiderea circuitului conform expresiei

$$i = I_0 e^{\frac{-t}{\tau}}; \quad \frac{i}{I_0} = \frac{1}{e} \quad \text{pentru } t = \tau,$$

unde I_0 este curentul de regim **permanent,** în A; t — timpul, în s; τ — constanta de timp $\tau = \frac{L}{R}$, în s.

Tabelul 4.1. **Valorile funcţiei exponenţiale** $e^{-\frac{t}{\tau}}$

$\frac{t}{\tau}=$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
$e^{-\frac{t}{\tau}}=$	0,82	0,67	0,55	0,45	0,37	0,22	0,135	0,082	0,050	0,018	0,0067

Energie

V. „Energie magnetică".

Energia magnetică

$$W_m = \frac{1}{2}\, vBH = \frac{1}{2}\,\mu v H^2 = \frac{1}{2}\,\Phi i = \frac{1}{2}\,Li^2, \qquad \text{unitatea: Ws (joule)}$$

unde: B este inducţia magnetică, în Vs/cm²;
H — intensitatea cîmpului magnetic, în A/cm;
L — inductanţa, în H (1H = 1 Vs/A);
μ — permeabilitatea, în H/cm;
v — volumul, în cm³;
Φ — fluxul magnetic, în Vs (Wb);
i — curentul, în A.

Observaţie 1 Ws = 1J (Joule); 1Vs = 1Wb.
Densitatea de energie (pe unitatea de volum):

$$\frac{W_m}{v} = \frac{1}{2}\,BH = \frac{1}{2}\,\mu H^2 = \frac{1}{2}\,\frac{B^2}{\mu}, \quad \text{unitatea: Ws/cm}^3.$$

Dacă se măsoară B în Gs şi H în Oe, obţinem

$$\frac{W_m}{v} = \frac{1}{8\pi}\,BH, \quad \text{unitatea: erg/cm}^3.$$

Produsul de energie, energia cîmpului magnetic din întrefier;
$(B_aH_a)_{max}$ este energia magnetică W_m pe care un magnet cu volumul v = 1 cm³ o poate înmagazina pentru dimensiuni optime în întrefier.
$(BH)_{max}$ este produsul maxim al valorilor corelate ale lui B şi H de pe curba de demagnetizare, aproximat prin construcţie cu cel corespunzător unui punct situat pe diagonala dreptunghiului B_rH_c din fig. 4.12 (pag. 208).
În punctul de intersecţie P

$$B_aH_a = (BH)_{max}$$

$(BH)_{max}$ este uneori numit şi indice de calitate sau energia magnetică **exterioară.**

Factorul de curbă (sau factorul de completitudine)
al curbei de demagnetizare a magneţilor permanenţi (notat de asemenea şi cu ξ) este

$$\gamma = \frac{(BH)_{max}}{B_r\,{}_BH_c}.$$

V. „Remanenţa" p. 229, „Cîmp coercitiv" p. 202 şi fig. 4.12.

Factor de demagnetizare
are expresia generală

$$N = \frac{H' - H}{\frac{J}{\mu_0}} = \frac{H' - H}{\frac{B}{\mu_0} - H}$$

unde: H' este intensitatea cîmpului magnetic exterior } în A/m;
H — intensitatea cîmpului magnetic interior } în A/m;
J — polarizaţia magnetică } în Vs/m²;
B — inducţia magnetică } în Vs/m²;
μ_0 — permeabilitatea vidului, în H/m.

$$N = \frac{H' - H}{4\pi J} \text{ cînd } J \text{ se măsoară în A/mm şi } H \text{ în Oe.}$$

N = tg ϑ; v. fig. 4.1, 4.2 şi 4.12 şi „Alunecarea" p. 201.
În particular (pentru H' = 0) pentru magneţii permanenţi (fig. 4.2):

$$N = \operatorname{tg}\vartheta = \frac{H_r'}{\frac{J_r'}{\mu_0}} = \frac{H_r'}{\frac{B_r'}{\mu_0} + H_r'},$$

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{\operatorname{tg}\vartheta} = \frac{B_r'}{H_r'\,\mu_0} + 1; \quad \frac{B_r'}{H_r'\,\mu_0} = \operatorname{tg}\psi.$$

Relaţia dintre N şi B_a/H_a:

$$\operatorname{tg}\vartheta = N = \frac{1}{\frac{B_a}{H_a} + 1} = \frac{1}{\operatorname{tg}\psi + 1}; \quad \operatorname{tg}\psi = \frac{B_a}{H_a} = \frac{1}{\operatorname{tg}\vartheta} - 1.$$

unde: B_a este inducţia magnetică în punctul de funcţionare de pe curba de demagnetizare, în Gs,
H_a — intensitatea cîmpului magnetic în punctul de funcţionare de pe curba de demagnetizare, în Oe.

Factor de pierderi

Factorul de pierderi tg δ al unui material izolant este tangenta unghiului prin care defazajul dintre curentul şi tensiunea la bornele condensatorului diferă de $\pi/2$ atunci cînd dielectricul condensatorului constă exclusiv din materialul izolant despre care este vorba.

Ferită

Materialul magnetic bazat pe oxid de fier (FeO sau Fe_2O_3); conţine alţi oxizi de metale bivalente (X) care dau formula $XO.Fe_2O_3$. Metalele X sînt: Mn, Cu, Mg, Ni, Zn. Aceste materiale au o rezistivitate foarte mare, de aproximativ $10^6 \Omega mm^2/m$. Materia primă este, în mod normal, sub formă de pulbere şi este presată şi sinterizată.

Magnetismul feritelor este numit ferimagnetism.

Flux magnetic

$$\Phi = \int \mathbf{B}\, d\mathbf{A} \text{ (în general).}$$

În particular dacă B este constant şi normal pe suprafaţa A,

$$\Phi = BA = \mu HA = \frac{\mu F_m A}{l} = \frac{\mu i w A}{l} = \frac{iw}{R_m}, \quad \text{unitatea: Vs (Wb)},$$

unde $R_m = \dfrac{1}{\mu A}$ este reluctanţa în cazul unui material cu permeabilitatea absolută μ.
B — inducţia magnetică în Vs/cm²;
H — intensitatea cîmpului magnetic, în A/cm;
F_m — tensiunea magnetomotoare, în A;
μ — permeabilitatea absolută, în H/cm;
i — curentul, în A,
A — suprafaţa, în cm²,
w — numărul de spire,
l — lungimea, în cm.

Relaţii între unităţi: 1Vs = 1Wb = 10^8 Gs cm² = 10^8 Mx; 1 H = 1 Vs/A.

Cînd se măsoară B în Gs se obţine unitatea absolută maxwell. 1 Mx (maxwell) = 1 Gs cm².

Dacă circuitul magnetic este alcătuit din porţiuni de permeabilitate diferită μ_1, μ_2... avînd lungimi diferite l_1, l_2,..., atunci

$$\Sigma F_m = \frac{B_1 l_1}{\mu_0 \mu_1} + \frac{B_2 l_2}{\mu_0 \mu_2} + \cdots = \frac{1}{1{,}256}\left[\frac{B_1 l_1}{\mu_1} + \frac{B_2 l_2}{\mu_2} + \cdots\right];$$

$$\Sigma F_m = \frac{1}{1{,}256}\left[\frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \cdots\right]\Phi; \quad B_1 A_1 = B_2 A_2 = \ldots = \Phi.$$

Flux magnetic total

$$\Phi w = BAw,$$

unde: Φ este fluxul magnetic, în Wb (Vs);
w — numărul de spire;
B — inducţia magnetică, în Vs/cm²;
A — suprafaţa, în cm².

Formula puterii

pentru proiectarea maşinilor electrice. Formula puterii pe care se bazează proiectarea maşinilor electrice şi a transformatoarelor este

$$S = UI \cdot 10^{-3} = 4{,}44 fw\Phi I \cdot 10^{-11} \text{kVA}^{1)}.$$

Din această formulă se poate determina fluxul magnetic necesar pentru valorile dorite ale tensiunii şi puterii. Uzual valoarea numerică a lui Φ/Iw este cuprinsă între 150 şi 250.

Forţe în cîmp magnetic

Forţa portantă. Forţa de atracţie dezvoltată de un magnet este

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0} = \frac{B^2 A}{8\pi}; \quad \text{unitatea: dyna,}$$

unde: B este inducţia magnetică, în Vs/cm²;
A — suprafaţa magnetului, în cm².

Dacă se măsoară F în kgf se obţine

$$F = \frac{1}{9{,}81 \cdot 10^5} \frac{B^2 A}{8\pi} = 1{,}02 \cdot 10^{-6} \frac{B^2 A}{8\pi} = 4{,}05 \cdot 10^{-8} B^2 A \text{ kgf.}$$

Forţe electrodinamice. Două conductoare paralele de lungime l, în m, aflate la o distanţă a, în m, unul de altul şi prin care circulă un curent i, în A, acţionează unul asupra celuilalt cu o forţă F

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{l}{a} i^2 = 2 \frac{li^2}{a} \frac{1}{9{,}81 \cdot 10^7} = 2{,}04 \frac{l}{a} i^2 \cdot 10^{-8} \text{kgf.}$$

Frecvenţa reţelei de curent alternativ

$$f = \frac{n}{60} p, \quad \text{unitatea: } s^{-1}. \text{ (Hz)},$$

unde: n este turaţia generatorului, în rot/min;
p — numărul de perechi de poli a generatorului.

Gama

1γ = 10^{-5} Gs, cea mai mică unitate de cîmp folosită în geofizică.

Impedanţa

V. tabelul 4.2.

---

*) U în kV; I în kA

Impedanţe şi admitanţe

Tabelul 4.2. **Valorile impedanţei şi admitanţei în cazul unor elemente în serie**

Denumirea	Unitatea	Simbolul (modul)	Expresia în funcţie de L şi C	Expresia în funcţie de U şi I
Rezistenţa	Ω	R	–	$\frac{U}{I}\cos\varphi$
Reactanţa	Ω	X	$\omega L - \frac{1}{\omega C}$	$\frac{U}{I}\sin\varphi$
Impedanţa	Ω	Z	$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\frac{U}{I}$
Conductanţa	S sau $\frac{1}{\Omega}$	G	$\frac{R}{Z^2}$	$\frac{I}{U}\cos\varphi$
Susceptanţa	S sau $\frac{1}{\Omega}$	B	$-\frac{X}{Z^2}$	$\frac{I}{U}\sin\varphi$
Admitanţa	S sau $\frac{1}{\Omega}$	Y	$\frac{1}{Z}$	$\frac{I}{U}$

Pentru regimuri tranzitorii, de exemplu tensiuni în formă de impuls sau şoc în linii aeriene sau în bobinaje, se utilizează următoarele mărimi:

Frecvenţa de rezonanţă

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \text{ şi, prin urmare, } \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Oscilaţii amortizate

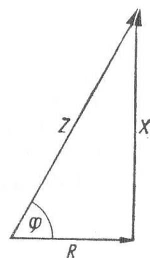


Fig. 4.21. Diagrama impedanţei în plan complex.

$$D = R\sqrt{\frac{C}{L}} \text{ amortizarea; } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ impedanţa caracteristică.}$$

Constanta de timp (răspunsuri tranzitorii)

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ (circuit } LR)$$

$$\tau = RC \text{ (circuit } CR),$$

unde: τ este constanta de timp;
L — inductivitatea, în H;
R — rezistenţa, în Ω;
C — capacitatea, în F.

În planul complex impedanţa se reprezintă ca în fig. 4.21.

Tabelul 4.3. **Impedanţa în circuitele serie, paralel şi mixt**

Schema	Impedanţa complexă	$Z = \vert \underline{Z} \vert$
Circuit serie		
R C	$\underline{Z} = R - j\frac{1}{\omega C}$	$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$
R L	$\underline{Z} = R + j\omega L$	$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$
R C L	$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$	$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$
Circuit paralel		
R, C	$\underline{Z} = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2} - j\frac{\omega C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$	$Z = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}$
R, L	$\underline{Z} = \frac{R\omega^2 L^2}{R^2 + \omega^2 L^2} + j\frac{R^2 \omega L}{R^2 + \omega^2 L^2}$	$Z = \frac{R\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$
R, C, L	$\underline{Z} = \frac{R^2\omega^2 L^2 + j R^2 \omega L (1 - \omega^2 LC)}{R^2 (1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 L^2}$	$Z = \frac{R\omega L}{\sqrt{R^2 (1 - \omega^2 LC)^2 - \omega^2 L^2}}$
Circuit mixt		
R C, L	$\underline{Z} = \omega L \frac{\omega^2 R C^2 L + j(\omega^2 R^2 C^2 - \omega^2 CL + 1)}{(\omega^2 CL - 1)^2 + \omega^2 R^2 C^2}$	$Z = \frac{\omega L \sqrt{\omega^2 R^2 C^2 + 1}}{\sqrt{(\omega^2 CL - 1)^2 + \omega^2 R^2 C^2}}$
R L, C	$\underline{Z} = \frac{R + j\omega (L - \omega^2 C L^2 - R^2 C)}{(1 - \omega^2 CL)^2 + \omega^2 C^2 R^2}$	$Z = \frac{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}{\sqrt{(1 - \omega^2 CL)^2 + \omega^2 C^2 R^2}}$

Indice de pierderi (învechit)

Indicele de pierderi ε_r'' al unui material izolant este egal cu produsul dintre permitivitatea relativă ε_r a acestuia şi factorul lui de pierderi $\operatorname{tg}\delta$;

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_r \operatorname{tg}\delta.$$

Pierderile de putere din dielectricul unui condensator pot fi calculate cu formula:

$$P = U^2 \omega C \varepsilon_r'',$$

în care: P este pierderea de putere, în W;
U — valoarea efectivă a tensiunii aplicate la bornele condensatorului, în V;
ω — pulsaţia, în rad/s;
C — capacitatea, în F.

Inducţia magnetică

O buclă din sîrmă conductoare, avînd suprafaţa A şi o rezistenţă electrică R, face să circule o cantitate de electricitate Q atunci cînd se scoate (se introduce) într-un cîmp magnetic, caracterizat prin inducţia magnetică B.

$$B = \frac{RQ}{A} = \int \frac{E\mathrm{d}t}{A}, \quad B = \frac{\Phi}{A} = \mu H = \frac{\mu i w}{l},$$

unde $\int E\mathrm{d}t$ este integrala în funcţie de timp a intensităţii cîmpului electric.

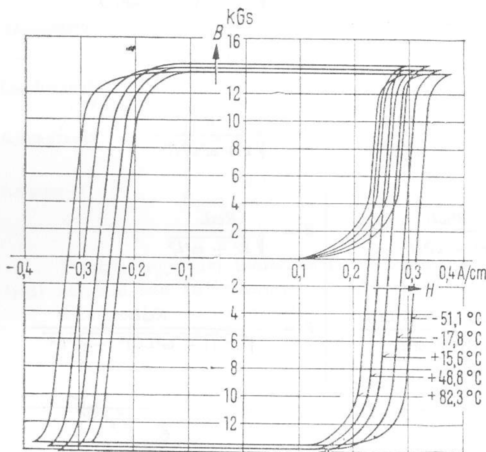


Fig. 4.22. Efectul temperaturii asupra ciclului de histerezis a materialului PERMENORM 5000 Z produs de VAC, miez toroidal de 0,127 mm, 60 Hz. Viteza de histerezis 1 ms.

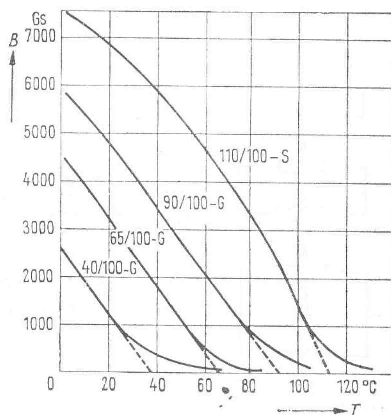


Fig. 4.23. Curbele $B(T)$ ale celor mai obişnuite aliaje THERMOFLUX produse de VAC [1]), măsurate de VAC.

Intensitatea cîmpului

V. „Cîmp electric," (p. 202) „Cîmp magnetic" (p. 203) şi „Cîmp exterior" (p. 203).

Încărcarea unui condensator

Energia electrică:

$$W = \frac{1}{2} Cu^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \qquad \left(\frac{1}{2} \hat{u}^2 = U^2\right).$$

Curentul de încărcare (c.a.): $I = 2\pi f C U$,

unde: W este energia necesară pentru încărcarea condensatorului, în Ws (J);
C — capacitatea, în F;
u — tensiunea, în V (valoarea instantanee);

[1] VAC: Vacuumschmelze Aktiengesellschaft, Hanau.

Q este sarcina electrică a condensatorului, în C;
U — valoarea efectivă a tensiunii, în V;
I — valoarea efectivă a curentului, în A;
f — frecvenţa curentului alternativ, în s^{-1} $(2\pi f = \omega)$.

Legea inducţiei electromagnetice v. „Legea lui Faraday".

Legea lui Faraday (legea inducţiei electromagnetice)

$$e = -w\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}i^{1)}}{\mathrm{d}t}; \quad L = \frac{w\Phi}{i},$$

unde: e este tensiunea indusă, în V;
w — numărul de spire;
Φ — fluxul magnetic, în Wb;
t — timpul, în s;
L — inductivitatea proprie, în H;
i — curentul, în A.

Cînd se măsoară Φ în Mx şi L în H se obţine

$$e = -w\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}10^{-8}\,\mathrm{V}.$$

Cînd variaţia fluxului în timp este sinusoidală, valoarea efectivă a t.e.m. este

$$E = 4{,}44\, f w \Phi \cdot 10^{-8} \quad (2\pi/\sqrt{2} \approx 4{,}44)$$

unde Φ este valoarea maximă a fluxului, exprimată în Mx.

$$\text{Factorul de formă } (C_f) = \frac{\text{valoarea efectivă}}{\text{valoarea medie}} = \frac{\frac{1}{2}\sqrt{2}}{2/\pi} \approx \frac{0{,}707}{0{,}637} \approx 1{,}11.$$

Observaţie: $4C_f = 4{,}44$.

Valoarea maximă, valoarea efectivă şi valoarea medie ale undei sinusoidale sînt în raport 1 : 0,707 : 0,637.

Magnetism terestru

În Germania [2]) inducţia magnetică provocată de cîmpul magnetic al Pămîntului este de aproximativ 0,45Gs = $0{,}45 \cdot 10^{-4}$ Wb/m²; componenta orizontală este de circa 0,2 Gs, iar componenta verticală este de aproximativ 0,4 Gs. Unitatea de cîmp cea mai mică folosită în geofizică este $1\gamma = 10^{-5}$Gs.

[1]) Corespunde cazului cînd introductivitatea L este constantă.
[2]) În România inducţia magnetică terestră este: componenta orizontală 22 490 γ; componenta verticală 41 005 γ.

Magnetizare

a) Polarizaţia magnetică J (Intensitatea magnetizării, inducţia intrinsecă B_i);

$J = \mathbf{B} - \mu_0\mathbf{H}$, unitatea: Vs/cm^2;

b) Magnetizaţia:

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{J}}{\mu_0} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \text{ unitatea: } A/cm,$$

unde: B este inducţia magnetică, în Vs/cm^2;
H — intensitatea cîmpului, în A/cm;
μ_0 — permeabilitatea magnetică a vidului, în H/cm.

Materiale diamagnetice

Permeabilitatea relativă $\mu_r < 1$ } sînt independente de
Susceptivitatea relativă $\varkappa_r < 0$ } intensitatea cîmpului magnetic.

V. de asemenea „Permeabilitatea" (p. 221), „Susceptivitatea" (p. 232) şi fig. 4.24 şi 4.25.

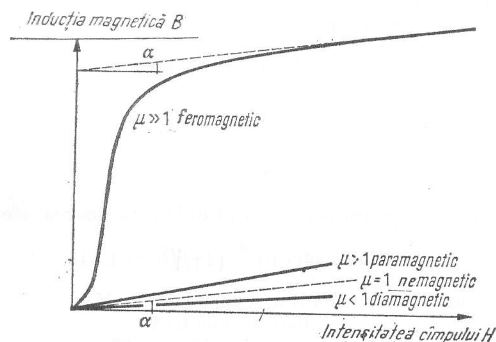


Fig. 4.24. Curbele $B(H)$ tipice pentru materialele feromagnetice ($\mu \gg 1$), paramagnetice ($\mu > 1$), diamagnetice ($\mu < 1$) şi nemagnetice ($\mu = 1$).

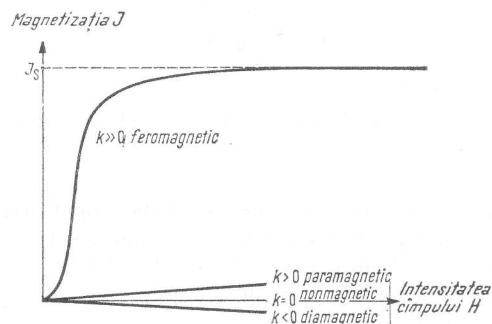


Fig. 4.25. Curbele $J(H)$ tipice pentru materialele feromagnetice ($k \gg 0$), paramagnetice ($k > 0$), diamagnetice ($k < 0$) şi nemagnetice ($k = 0$).

Materiale feromagnetice

Permeabilitatea relativă $\mu_r \gg 1$ } depind în mare măsură de intensitatea cîmpului magnetic
Susceptivitatea relativă $\varkappa_r \gg 1$ } (v. figura 4.24 şi 4.25).

Materiale paramagnetice

Permeabilitatea relativă $\mu_r > 1$ } aproximativ independente de intensitatea
Susceptivitatea relativă $\varkappa_r > 0$ } cîmpului magnetic.

V. „Permeabilitatea", „Susceptivitatea" (p. 232) şi fig. 4.24 şi 4.25.

Moment magnetic

În conformitate cu Coulomb: $m = \frac{C}{H} = Jv$, unitatea: Vs cm;

În conformitate cu Ampère: $m' = \frac{C}{B} = \frac{C}{H\mu_0}$, unitatea: $A\,cm^2$;

unde: C este cuplul maxim exercitat asupra corpului magnetizat în cîmpul H, în Vs A;
H — intensitatea cîmpului magnetic, în A/cm;
J — polarizaţia magnetică, în Vs/cm^2;
v — volumul, în cm^3;
B — inducţia magnetică a cîmpului exterior, în Vs/cm^2;
μ_0 — permeabilitatea magnetică a vidului, în H/cm.

Permanenţa unui magnet permanent

Punctul J_p de intersecţie al curbei de magnetizare inversă (figura 4.12, curba P', P'' J_p) care îşi are originea într-un punct de pe curba de demagnetizare, cu axa B (v. şi fig. 4.28).

Unitatea: aceeaşi ca pentru inducţia magnetică.

Permeabilitatea

Permeabilitatea absolută μ este raportul dintre inducţia magnetică şi intensitatea cîmpului magnetic în acelaşi punct într-un cîmp magnetic. În aer ea este aproximativ egală cu permeabilitatea vidului (v. pag. 224). Unitatea: aceeaşi ca pentru permeabilitatea vidului.

Permeabilitatea relativă

$$\mu_r = \frac{B}{H\mu_0} \text{ sau } \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}.$$

Permeabilitatea iniţială μ_a este coeficientul unghiular (panta) al curbei de magnetizare normală faţă de axa H, în origine; $\text{tg}\,\alpha = \mu_a$ (figura 4.26, pag. 222).

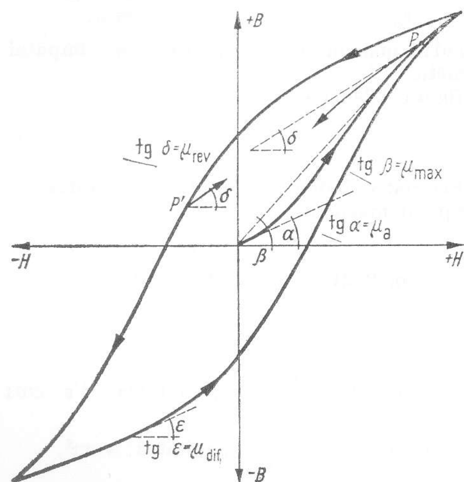


Fig. 4.26. Definirea permeabilităţilor magnetice.

P e r m e a b i l i t a t e a m a x i m ă μ_{max} este coeficientul unghiular maxim al curbei $B(H)$ faţă de axa H; $tg\beta = \mu_{max}$ (figura 4.26).

P e r m e a b i l i t a t e a s t a t i c ă (totală) μ_s este coeficientul unghiular al unei drepte duse din origină pînă într-un punct (B, H) de pe curba de magnetizare.

P e r m e a b i l i t a t e a d i f e r e n ţ i a l ă μ_d este tangenta unghiului de înclinare al curbei de magnetizare sau al ciclului într-un punct de funcţionare faţă de axa H (figura 4.26).

$$\mu_d = \text{tg}\,\varepsilon = \frac{dB}{dH}.$$

P e r m e a b i l i t a t e a i n c r e m e n t a l ă μ_Δ

$$\mu_\Delta = \frac{B_\Delta}{H_\Delta}$$

este raportul dintre o variaţie ciclică finită a lui B (inducţia incrementală B_Δ) şi variaţia ciclică corespunzătoare a lui H (intensitatea incrementală H_Δ a cîmpului magnetic), atunci cînd densitatea fluxului înainte de variaţie este $B_b \neq 0$, adică în cazul unui cîmp magnetic de polarizaţie H_b.

P e r m e a b i l i t a t e a d e i m p u l s $\overline{\mu}$ (figura 4.27).

$$\overline{\mu} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

este raportul dintre creşterea ΔB a inductanţei magnetice şi creşterea ΔH a intensităţii cîmpului magnetic în cazul unei magnetizări într-un singur sens, adică atunci cînd intensitatea cîmpului magnetic variază între zero şi $+H$, sau între zero şi $-H$.

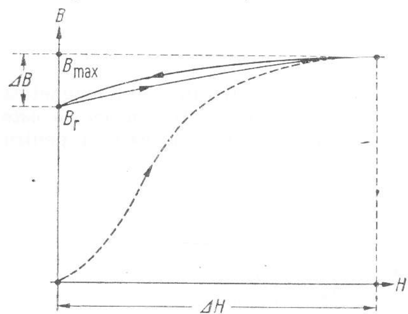


Fig. 4.27. Definiţia permeabilităţii de impuls $\overline{\mu} = \Delta B/\Delta H$.

P e r m e a b i l i t a t e a p e r m a n e n t ă μ_p (magnet permanent) depinde de valoarea variaţiei ΔB şi ΔH, şi, în consecinţă, depinde de amplitudine (figura 4.28).

Pentru punctul cel mai depărtat B_p:

$$\mu_p = \text{tg}\,\delta_2 = \frac{B_p - B}{H - H_p}$$

Pentru punctul cel mai depărtat J_p:

$$\mu_p = \text{tg}\,\delta_3 = \frac{J_p - B}{H}.$$

P e r m e a b i l i t a t e a r e v e r s i b i l ă μ_{rev}, în general, pentru variaţii de stare reversibile foarte mici în cazul unui ciclu de magnetizare invers, permeabilitatea incrementală μ_Δ se transformă în permeabilitatea reversibilă μ_{rev}; ea devine apoi egală cu permeabilitatea μ_d pentru punctul de plecare al unei curbe de magnetizare inversă (figura 4.26): $\text{tg}\,\delta_1 = \mu_{rev}$; $\text{tg}\,\varepsilon = \mu_d$);

În particular, pentru magneţii permanenţi (figura 4.28), pentru variaţii foarte mici ale lui B şi H are loc relaţia $\mu_p = \mu_{rev}$.

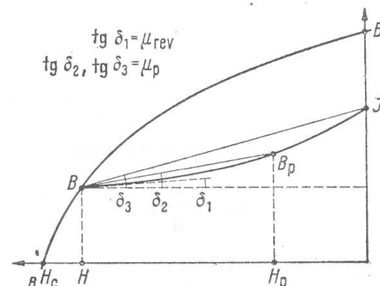


Fig. 4.28. Definiţia permeabilităţii reversibile şi a permanenţei magneţilor permanenţi.

P e r m e a b i l i t a t e a î n c î m p a l t e r n a t i v. În cazul unei magnetizări sinusoidale cîmpul H prezintă armonice, iar armonica fundamentală H_1 a cîmpului prezintă un defazaj δ faţă de inducţia magnetică B. În acest caz se pot defini următoarele:

Permeabilitatea alternativă, raportată la valoarea maximă; valoarea ei absolută este B_{max}/H_{max}, iar valoarea ei relativă este $B_{max}/(\mu_0 H_{max})$.

Permeabilitatea alternativă raportată la valoarea efectivă; valoarea ei absolută este $B_{ef}/(\mu_0 H_{ef})$.

Permeabilitatea aparentă; valoarea ei absolută este $\mu_a = B_{max}/H_{1max}$, iar valoarea ei relativă este $\mu_a/\mu_0 = B_{max}/(\mu_0 H_{1max})$.

În relaţiile de mai sus B_{max} este valoarea maximă, iar B_{ef} este valoarea efectivă a inducţiei magnetice, care variază sinusoidal; H_{max} este valoarea maximă, iar H_{ef} este valoarea efectivă a cîmpului magnetic total; H_{1max} este valoarea maximă a armonicii fundamentale a cîmpului magnetic.

P e r m e a b i l i t a t e a c o m p l e x ă:

$|\underline{\mu}| = \mu_a$ permeabilitatea aparentă;

$\mu_{Re} = \mu' = \mu_a \cos\delta$ componenta reală;

$\mu_{Im} = \mu'' = \mu_a \sin\delta$ componenta imaginară.

O definiţie întrutotul corespunzătoare se poate obţine pentru cazul curentului alternativ, cînd intensitatea H a cîmpului magnetic variază sinusoidal în raport cu timpul.

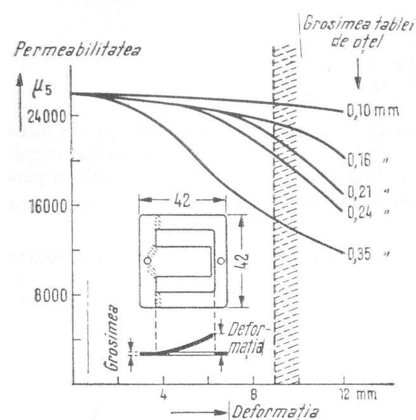


Fig. 4.29. Efectul deformării unei tole asupra permeabilității materialului MUMETALL, produs de VAC.

Inducția magnetică B are atunci armonice, iar armonica sa fundamentală prezintă un defazaj față de intensitatea sinusoidală a cîmpului. Pentru evitarea confuziilor trebuie să se arate la care dintre cele două cazuri se referă cifrele date.

Uneori întîlnim definiția „Permeabilitate efectivă":

$$p = \frac{B_{max}}{H_{ef}}, \text{ unitatea: } \frac{\text{Gs cm}}{A_{(ef)}}\left(\frac{\text{W}_b}{\text{mA}_{(ef)}}\right).$$

Transformarea în μ pentru H sinusoidal:

$$p = 0{,}4\pi\sqrt{2}\mu = 1{,}78\,\mu.$$

Permeabilitatea magnetică a vidului

Permeabilitatea vidului (practic este egală cu cea a aerului) este o constantă definită prin

$$\mu_0 = \frac{B}{H};$$

unde: B este inducția magnetică, în Wb/m²;
H — intensitatea cîmpului, în A/m,
cele două mărimi corespunzînd unui punct din aer (vid

$$\mu_0 = 1\,\frac{\text{Gs}}{\text{Oe}} = 0{,}4\pi\cdot 10^{-8}\,\frac{\text{Vs}}{\text{A cm}} = 4\pi\cdot 10^{-9}\,\frac{\text{H}}{\text{cm}} = 4\pi\cdot 10^{-7}\,\frac{\text{H}}{\text{m}}.$$

Permeanța

Valoarea reciprocă a reluctanței R_m, numită de asemenea conductanță magnetică.

$$\Lambda = \frac{\Phi}{wi} = \frac{A\mu}{l}, \text{ unitatea: henry (H)},$$

unde: Φ este fluxul magnetic, în Vs;
w — numărul de spire;
l — lungimea circuitului, în cm;
μ — permeabilitatea, în H/cm;
A — suprafața, în cm²;
i — curentul, în A.

Permitivitatea

Permitivitatea relativă ε_r a unui material izolant este raportul dintre capacitatea C_x a unui condensator în care spațiul dintre electrozi și din jurul acestora este umplut complet și exclusiv cu materialul izolant respectiv, și capacitatea C_0 a aceleiași configurații de electrozi în aer:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0},$$

unde: $\varepsilon = \varepsilon_0\,\varepsilon_r$ este permitivitatea absolută, în F/cm;

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 C^2} = \frac{1}{4\pi 9\cdot 10^9} \approx 0{,}885\cdot 10^{-12}\ \text{F/cm} \text{ — permitivitatea vidului.}$$

Pierderi în dielectric

V. „Factor de pierderi".

Pierderi magnetice

Pierderi prin histerezis, pierderi în fier, pierderi în miez, pierderi prin curenți turbionari.

Pierderi prin histerezis pe ciclu de magnetizare Q_h:

Energia magnetică care este transformată prin histerezis în căldură sau acea parte din energia magnetică înmagazinată, care nu este redată circuitului din cauza histerezisului. Pierderile prin histerezis pe ciclu de magnetizare și pe unitatea de volum

$$\frac{Q_h}{v} = \oint H\,\mathrm{d}B = \oint H\,\mathrm{d}J, \text{ unitatea Ws/cm}^3,$$

unde: v este volumul, în cm³;
B — inducția magnetică, în Vs/cm²;
H — intensitatea cîmpului magnetic, în A/cm;
J — polarizația magnetică în Vs/cm².

Cînd se măsoară B și J în Gs și H în Oe, obținem:

$$\frac{Q_h}{v} = \frac{1}{4\pi}\oint H\,\mathrm{d}B = \frac{1}{4\pi}\oint H\,\mathrm{d}J, \quad \text{unitatea: erg/cm}^3.$$

Observație: $\oint H\,\mathrm{d}B$, $\oint H\,\mathrm{d}J$ sînt integrale de suprafață ale buclelor de histerezis cuprinse între limitele $+B$ și $-B$, sau $+J$ și $-J$.

Pierderile prin histerezis P_h:

Puterea măsurată de obicei la 50 Hz (sau 60 Hz în S.U.A.), disipată prin histerezis (frecvența f în s⁻¹) în unități de timp și volum.

Raportate la unitatea de volum

$$P_h = \frac{Q_h}{v}f = f\oint H\,\mathrm{d}B = f\oint H\,\mathrm{d}J, \text{ unitatea: W/cm}^3.$$

Folosind factorul $1/4\pi$ obținem unitatea erg/s cm³ = 10^{-7} W/cm³.

Raportate la masă:

$$\frac{P_h}{\rho} = \frac{Q_h}{v}\,\frac{f}{\rho} \quad (\rho \text{ este densitatea în g/cm}^3).$$

$$\frac{P_h}{\rho} = 10^{-3}\,\frac{f}{\rho}\oint H\,\mathrm{d}B \quad \text{unitatea raţionalizată: W/kg,}$$

$$\frac{P_h}{\rho} = \frac{10^{-3}}{4\pi}\,\frac{f}{\rho}\oint H\,\mathrm{d}B \quad \text{unitatea neraţionalizată: erg/kg.}$$

La frecvenţe f înalte sau în cazul unor grosimi d mari ale epruvetei vor avea loc atît pierderi prin curenţi turbionari, cît şi prin histerezis, suma lor reprezentînd pierderile totale de energie (adeseori numite „pierderi watt"). Formulele date mai sus conţin, din această cauză, şi pierderile prin curenţi turbionari atunci cînd f şi d au valoare mare.

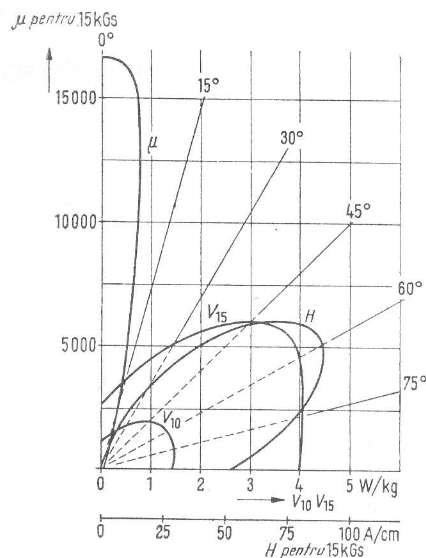


Fig. 4.30. Dependenţa de direcţia de magnetizare a lui μ şi H pentru 15 kGs, V_{10}, V_{15} pentru tablă de oţel „Orientat M7X": măsurare efectuată de Siemens AG.

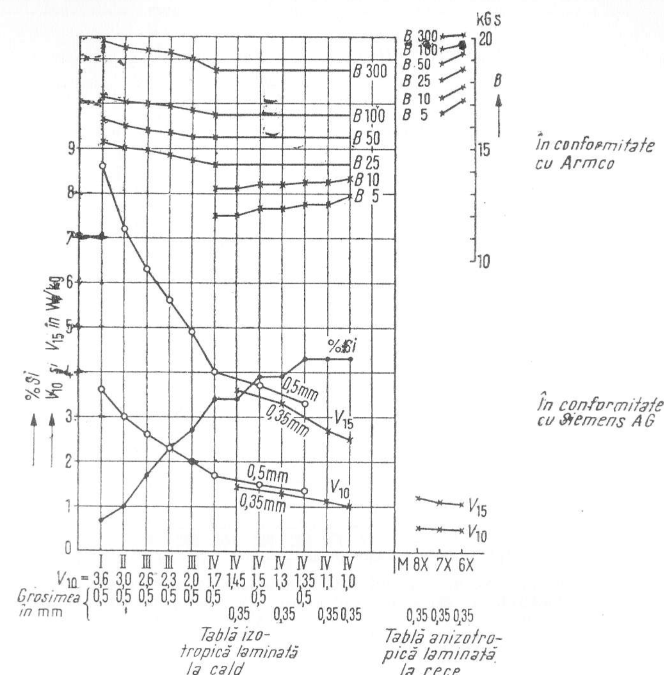
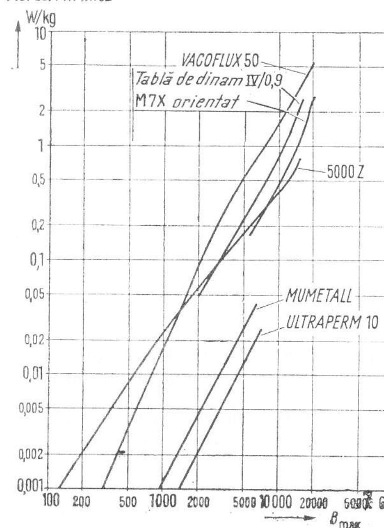


Fig. 4.31. Inducţia şi pierderile tablei de oţel pentru dinam şi transformator.



Polarizaţia magnetică

V. „Magnetizare".

Punct de funcţionare

Punctul de funcţionare este punctul aflat pe curba de magnetizare, pe ciclul de histerezis sau pe o linie de magnetizare interioară determinat de inducţia B şi de intensitatea H a cîmpului magnetic, care reprezintă starea magnetică a unei anumite părţi a unui circuit magnetic, într-un anumit moment.

Fig 4.32. Curbele care reprezintă pierderile în funcţie de inducţia magnetică maximă. Măsurare: VAC[1] şi Siemens AG.

[1] VAC: Vacuumschmelze Aktiengesellschaft, Hanau

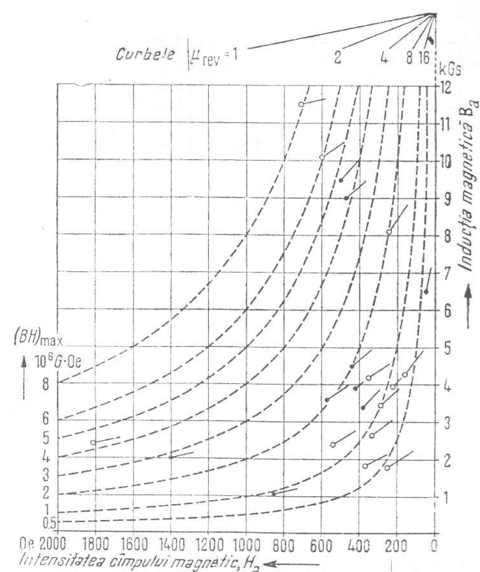


Fig. 4.33. Poziția punctului de funcționare la materialele standardizate (●) și nestandardizate (O) pentru magneți permanenți (pentru un conținut maxim de energie) cu curbele μ_{rev} și hiperbolele $(BH)_{max}$.

Definiție specială pentru magneții permanenți:

Punctul P' din figura 4.12, pag. 207 (punctul de funcționare de pe curba de demagnetizare), sau punctul P'' de pe curba de magnetizare interioară P' J_p.

Puterea și energia electrică

$P = RI^2 = U^2/R = UI$ în curent continuu (c. c.),

$P = UI \cos \varphi$ în curent alternativ monofazat (c.a.);

$P = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi$ în curent alternativ trifazat în regim simetric ($\cos \varphi$ = factorul de putere);

$W = \int_{t_1}^{t_2} ui \, dt$ ($t_2 - t_1$ = intervalul de timp),

unde: P este puterea electrică, în W;
U — tensiunea (valoarea efectivă), în V;
W — energia electrică, în Ws;
I — curentul (valoare efectivă), în A;
R — rezistența circuitului, în Ω;
t — timpul, în s.

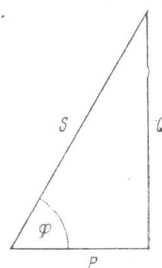


Fig. 4.34. Diagrama puterilor.

Într-o rețea de curent alternativ diferitele puteri, date în tabelul 4.4, sînt folosite pentru scopuri de calcul; acestea pot fi reprezentate geometric cu ajutorul unui triunghi dreptunghic (fig. 4.34).

Tabelul 4.4. **Puterile în curent alternativ**

Mărimea	Curent monofazat	Curent trifazat, simetric
Puterea aparentă S, în VA	UI	$\sqrt{3}UI$
Puterea activă P, în W	$UI \cos \varphi$	$\sqrt{3}\, UI \cos \varphi$
Puterea reactivă Q, în Var	$UI \sin \varphi$	$\sqrt{3}\, UI \sin \varphi$
Factorul de putere $\cos \varphi$	P/S	P/S

Reactanță

V. tabelul 4.2.

Reluctanță

Valoarea reciprocă a permeanței:

$R_m = \frac{1}{\Lambda}$. Definită la „Flux magnetic (p. 214)."

Remanență

În general în circuite deschise și închise, precum și în cicluri incomplete. Caz particular pentru $H = 0$, cînd materialul se găsește într-o stare magnetică simetrică. Valoarea limită a remanenței (pentru $H = 0$) în cazul magnetizării pînă la saturație se numește retentivitate (v. fig. 4.2 intensitatea cîmpului de demagnetizare H_r').

Remanența reală $B_r = J_r$. Punctul de intersecție al ciclului de histerezis cu axa B (fig. 4.2).

Remanența aparentă: polarizația magnetică remanentă aparentă J_r: punctul de intersecție al curbei de demagnetizare sau de alunecare (v. fig. 4.1, și 4.2)

$H = \frac{J}{\mu_0} \operatorname{tg} \vartheta$ (μ_0 — permeabilitatea vidului)

cu curba de demagnetizare $J = f(H)$.

Inducția remanentă aparentă:

$$B_r' = J_r' - H_r' \mu_0.$$

Unitățile de măsură sînt aceleași ca pentru inducția magnetică și polarizația magnetică.

Retentivitate

V. „Remanență"

Rezistența de izolație

Rezistența de izolație dintre doi electrozi care sînt în contact cu un material izolant sau sînt înglobați în acesta, este raportul dintre tensiunea continuă aplicată elec-

trozilor și curentul total dintre aceștia la un anumit timp după aplicarea acelei tensiuni (după dispariția eventualului regim tranzitoriu).

Rezistența de izolație depinde atît de rezistența de volum, cît și de rezistența de suprafață ale materialului izolant (v. „Rezistența de suprafață“ și „Rezistența de volum“).

Rezistența în c.c.

Rezistența în c.c. a unui conductor este

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{\gamma A} \qquad \left(\gamma = \frac{1}{\rho}\right)^{1)}$$

unde l este lungimea conductorului, în m;
A — secțiunea transversală, în mm²;
ρ — rezistivitatea, în Ωmm²/m;
γ — conductivitatea, în m/Ωmm².

Creșterea rezistenței ca urmare a încălzirii conductorului pînă la θ°C este $R_\theta - R_{20}$ în care R_θ este rezistența la θ°C, iar R_{20} este rezistența la 20°C. Formula este

$$R_\theta = R_{20}\,[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)]^{1)}.$$

Rezistențe legate în serie: $R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$

Rezistențe legate în paralel: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots$

Două rezistențe legate în paralel:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Rezistență de suprafață

Rezistența de suprafață R_s dintre doi electrozi plasați pe suprafața unui material izolant este raportul dintre tensiunea continuă și curentul care curge între electrozi printr-un strat subțire de pe suprafață. Aceasta nu este o proprietate specifică materialului, dar ea furnizează informații cu privire la starea izolației la suprafața unui material izolant, care poate fi modificată de influențe exterioare ca umiditatea, aciditatea etc.

Rezistență de volum

Rezistența de volum R_v dintre doi electrozi care sînt în contact cu un material izolant sau sînt înglobați într-un asemenea material este raportul dintre tensiunea continuă aplicată electrozilor și acea parte din curentul care circulă între ei care este distribuită în volumul materialului izolant.

Rezistivitate de volum

Rezistivitatea de volum ρ_v a unui material izolant este raportul dintre gradientul de potențial paralel cu direcția de curgere a curentului prin material și densitatea curentului. Rezistivitatea de volum a unui material izolant, în Ωcm, este egală cu re-

1) Pentru valorile lui α și ρ v. tabelul 2.21, pag. 82.

zistența de volum dintre fețele opuse ale unui centimetru cub din materialul respectiv. Valorile rezistivității de volum a diverselor materiale sînt date în figura 4.35.

Unitatea în sistemul SI: 1 Ωm = 10^2 Ωcm.

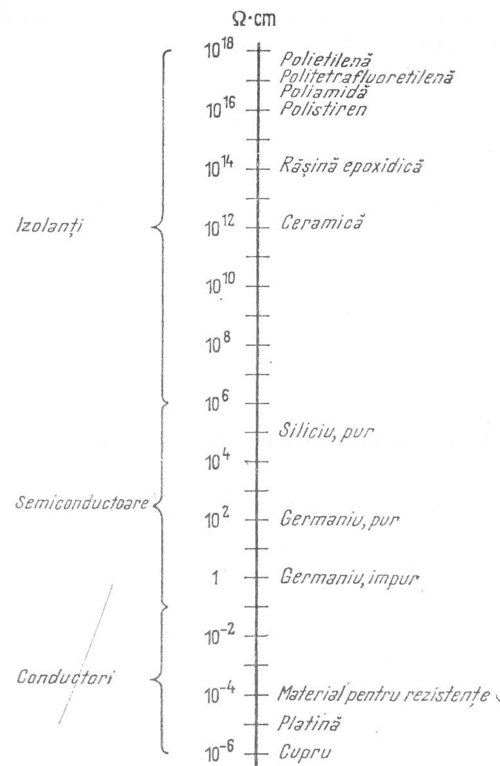


Fig. 4.35. Rezistivitatea de volum a materialelor electrice, în Ω cm.

Rigiditatea dielectrică

Rigiditatea dielectrică E_d a unui material izolant este definită ca raportul dintre tensiunea de străpungere U_d (în V) și distanța d dintre cei doi electrozi (în cm) cărora li se aplică tensiunea:

$$E_d = \frac{U_d}{d}, \qquad \text{unitatea uzuală: V/cm.}$$

Definiția rigidității dielectrice este valabilă numai pentru un cîmp uniform între electrozi.

Rigiditatea dielectrică nu este o proprietate specifică materialului. Ea depinde de grosimea epruvetei, de forma de undă a tensiunii de încercare, de viteza de creș-

tere a tensiunii, de durata de aplicare a tensiunii, de temperatura ambiantă, de presiunea aerului şi de umiditatea relativă.

Tensiunea de străpungere U_d este valoarea la care tensiunea dintre doi electrozi străpunge şi distruge materialul izolant.

Saturaţie

Polarizaţia magnetică de saturaţie J_s (inducţia magnetică de saturaţie B_s). Valoarea limită a polarizaţiei magnetice J la intensităţi foarte mari ale cîmpului. (Strict vorbind, nu există o inducţie magnetică de saturaţie, deoarece B creşte neîntrerupt cu H). V. de asemenea „Magnetizare" (p. 220).

Susceptanţă

V. tabelul 4.2.

Susceptivitate de masă şi susceptivitate molară

V. „Susceptivitatea magnetică"

Susceptivitate magnetică

Susceptivitate de volum

$$\varkappa = \frac{J}{H\mu_0} = \mu_r - 1,$$

unde: J este polarizaţia magnetică, în Vs/cm^2;
H — intensitatea cîmpului magnetic, în A/cm;
μ_r — permeabilitatea magnetică relativă;
μ_0 — permeabilitatea magnetică a vidului.

Cînd se măsoară J în A/mm şi H în Oe se obţine

$$\varkappa_n = \frac{J}{H} = \frac{\varkappa}{4\pi} = \frac{\mu_r - 1}{4\pi}.$$

Susceptivitate de masă

$$\chi = \frac{\varkappa}{\rho} \text{ (unde } \rho \text{ este densitatea)}$$

Susceptivitate molară

$$\chi_A = \chi A = \frac{\varkappa}{\rho} A \text{ (unde } A \text{ este masa atomică).}$$

Tensiunea magnetică

$$U_m = \Sigma i = F_m.$$

V. „Tensiune magnetomotoare".

Tensiunea magnetomotoare

$$F_m = \oint \mathbf{H}\,dl = \frac{1}{\mu}\oint \mathbf{B}\,dl, \quad \text{unitatea: amper-spira (în SI — amperul)}$$

$$F_m = \Sigma i = U_m; \qquad F_m = wi = U_m,$$

unde: Σi este suma tuturor curenţilor i (în A) care trec printr-o suprafaţă arbitrară ce se sprijină pe curba închisă;
H — intensitatea cîmpului magnetic, în A/cm;
B — inducţia magnetică, în Vs/cm^2;
w — numărul de spire (bobină cu cîmp omogen);
U_m — tensiunea magnetică, în A.

Tensiunea magnetomotoare este definită în cazul magneţilor permanenţi ca integrala de contur a intensităţii cîmpului magnetic indus H_e pentru variaţii de stare reversibile; v. „Cîmp magnetic".

Teoremele lui Kirchhoff

Într-o reţea compusă din rezistoare liniare şi surse de tensiune electromotoare au fost stabilite următoarele teoreme:

1. În orice nod din circuit suma algebrică a curenţilor care intră şi care ies este egală cu zero $\Sigma I = 0$.

2. În orice contur închis (ochi de reţea) al reţelei suma tensiunilor electromotoare (t. e. m.) este egală cu suma căderilor de tensiune $\Sigma E = \Sigma IR$ sau $\Sigma U_i + \Sigma IR = 0$ (unde s-a notat $U_i = -E$).

Curenţii, tensiunile electromotoare, tensiunile şi căderile de tensiune trebuie să fie indicate cu semnul corespunzător sensului lor (reguli referitoare la semne v. pag. 178). În cazul curentului alternativ aceste teoreme se aplică numai la valorile instantanee; în cazul folosirii valorilor efective trebuie să se ţină seama de defazaj. În acest ultim caz sînt valabile sumele şi diferenţele vectoriale ale tensiunilor şi curenţilor sinusoidali.

Transfigurarea impedanţelor

Transfigurarea a trei impedanţe legate în triunghi (fig. 4.36)

$$\underline{Z}_{12} = R_{12} + j X_{12}; \ \underline{Z}_{23} = R_{23} + j X_{23}; \ \underline{Z}_{31} = R_{31} + j X_{31}$$

într-o configuraţie în stea, care se compune din

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j X_1; \ \underline{Z}_2 = R_2 + j X_2; \ \underline{Z}_3 = R_3 + j X_3$$

are drept rezultat

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_{12}\,\underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}} = \frac{(R_{31} R_{12} - X_{31} X_{12})\, R + (X_{31} R_{12} + R_{31} X_{12})\, X}{R^2 + X^2} + $$
$$+ j \frac{(X_{31} R_{12} + R_{31} X_{12})\, R - (R_{31} R_{12} - X_{31} X_{12})\, X}{R^2 + X^2};$$

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_{23}\,\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}} = \frac{(R_{12} R_{23} - X_{12} X_{23})\, R + (X_{12} R_{23} + R_{12} X_{23})\, X}{R^2 + X^2} +$$

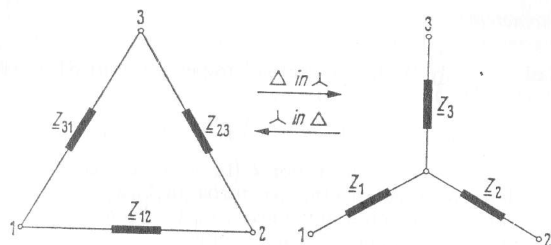


Fig. 4.36. Transfigurarea impedanţelor conectate în triunghi în impedanţe conectate în stea şi invers.

$$+\,\mathrm{j}\,\frac{(X_{12}\,R_{23}+R_{12}\,X_{23})\,R-(R_{12}\,R_{23}-X_{12}\,X_{23})\,X}{R^2+X^2};$$

$$\underline{Z}_3=\frac{\underline{Z}_{31}\,\underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12}+\underline{Z}_{23}+\underline{Z}_{31}}=\frac{(R_{23}R_{31}-X_{23}\,X_{31})\,R+(X_{23}R_{31}+R_{23}X_{31})\,X}{R^2+X^2}+$$

$$+\,\mathrm{j}\,\frac{(X_{23}\,R_{31}+R_{23}\,X_{31})\,R-(R_{23}\,R_{31}-X_{23}\,X_{31})\,X}{R^2+X^2}$$

unde $R=R_{12}+R_{23}+R_{31}$ şi $X=X_{12}+X_{23}+X_{31}$.

Transfigurarea a trei impedanţe legate în stea (fig. 4.36).

$$\underline{Z}_1=R_1+\mathrm{j}\,X_1;\ \underline{Z}_2=R_2+\mathrm{j}\,X_2;\ \underline{Z}_3=R_3+\mathrm{j}\,X_3$$

într-o configuraţie în triunghi care se compune din

$$\underline{Z}_{12}=R_{12}+\mathrm{j}\,X_{12};\ \underline{Z}_{23}=R_{23}+\mathrm{j}\,X_{23};\ \underline{Z}_{31}=R_{31}+\mathrm{j}\,X_{31}$$

are drept rezultat:

$$\underline{Z}_{12}=\frac{\underline{Z}_1\,\underline{Z}_2+\underline{Z}_2\,\underline{Z}_3+\underline{Z}_3\,\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3}=$$

$$=R_1+R_2+\frac{R_3\,(R_1R_2-X_1X_2)+X_3\,(R_1X_2+R_2\,X_1)}{R_3^2+X_3^2}+$$

$$+\,\mathrm{j}\left[X_1+X_2+\frac{R_3\,(R_1\,X_2+R_2\,X_1)-X_3\,(R_1\,R_2-X_1\,X_2)}{R_3^2+X_3^2}\right]$$

$$\underline{Z}_{23}=\frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2+\underline{Z}_2\underline{Z}_3+\underline{Z}_3\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1}=R_2+R_3+\frac{R_1\,(R_2R_3-X_2X_3)+X_1\,(R_2X_3+R_3X_2)}{R_1^2+X_1^2}+$$

$$+\,\mathrm{j}\left[X_2+X_3+\frac{R_1\,(R_2X_3+R_3X_2)-X_1\,(R_2R_3-X_2X_3)}{R_1^2+X_1^2}\right]$$

$$\underline{Z}_{31}=\frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2+\underline{Z}_2\underline{Z}_3+\underline{Z}_3\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1}=R_3+R_1+\frac{R_2\,(R_3R_1-X_3X_1)+X_2\,(R_3\,X_1+R_1X_3)}{R_2^2+X_2^2}+$$

$$+\,\mathrm{j}\left[X_3+X_1+\frac{R_2\,(R_3X_1+R_1X_3)-X_2\,(R_3\,R_1-X_3X_1)}{R_2^2+X_2^2}\right].$$

PARTEA DOUA

INSTALAŢII ŞI ECHIPAMENTE PENTRU PRODUCEREA, TRANSPORTUL ŞI DISTRIBUŢIA ENERGIEI ELECTRICE

5. CENTRALE ELECTRICE

5.1. CONSUMURI SPECIFICE DE ABUR ȘI DE CĂLDURĂ

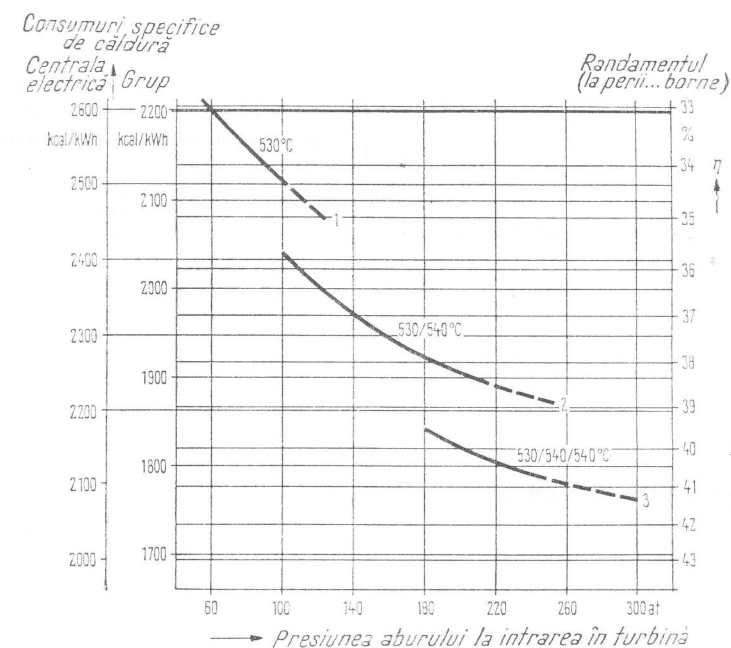


Fig. 5.1. Consumul specific de căldură la bornele generatorului si transformatorului in funcție de parametrii aburului viu și de supraîncălzirea intermediară (temperatura apei de răcire 10°C)
— fără supraîncălzire intermediară; *2* — cu o singură supraîncălzire intermediară; *3* — cu dublă supraîncălzire intermediară.

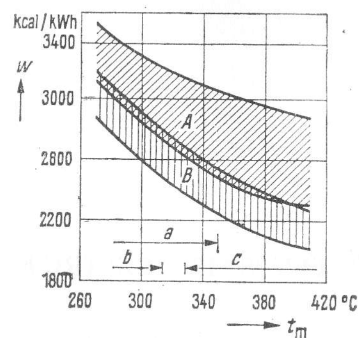


Fig. 5.2. Consumul specific de căldură în funcție de temperatura medie t_m a agentului de răcire al reactorului. Presiunea în condensator 0,05 ata:
A — consumul specific de căldură total al centralei; *B* — consumul specific de căldură al grupului turbogenerator; *a* — ciclu cu două presiuni; *b* — ciclu cu abur saturat; *c* — ciclu cu o singură presiune cu și fără supraîncălzire intermediară.

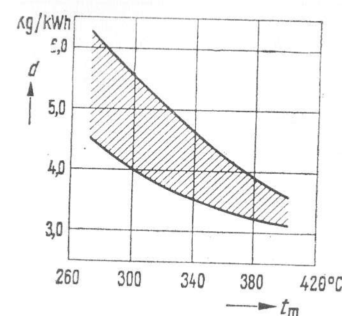


Fig. 5.3. Consumul specific de abur *d* al grupului turbogenerator în funcție de temperatura medie t_m a agentului de răcire al reactorului. Presiunea în condensator 0,05 ata.

Tabelul 5.1. Consumuri specifice de căldură

	Centrale electrice convenționale		Centrale electrice nucleare
	cu pompă de alimentare antrenată de motor	cu turbopompă de alimentare	
Consum specific de căldură al turbinei, W_T în kcal/kWh	$W_T = \frac{Q_{zuTu}}{P_T}$	$W_T = \frac{Q_{zuTu}}{P_T + P_{SpT}}$	$W_T = \frac{Q_{DE}\,\eta_V}{P_T + P_{TP}}$
	pentru mașini fără supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere $Q_{zuTu} = G_{ab}(i_{ab} - i_{al})$ pentru mașini cu supraîncălzire în armaturi cu gaze de ardere $Q_{zuTu} = G_{ab}(i_{ab} - i_{al}) + G_{si}(i_{ic2} - i_{ec1})$		cînd $Q_{DE} = Q_R + Q_P - Q_{RV}$
Consum specific total de căldură W_{tot}, în kcal/kWh	$W_{tot} = \frac{Q_{zuTu}}{P_T\,\eta_{DE}\,\eta_{tr}\,\eta_V\left(1 - \frac{EB}{100}\right)}$	$W_{tot} = \frac{Q_{zuTu}}{P_T\,\eta_{DE}\,\eta_{tr}\,\eta_V\left(1 - \frac{EB_{gl}}{100}\right)}$	$W_{tot} = \frac{Q_{DE}}{\eta_R\,\eta_{tr}\,(P_T - P_{Eel})}$ cînd $\eta_R = \frac{Q_{DE}}{Q_R} = 1 + \frac{Q_P}{Q_R} - \frac{Q_{RV}}{Q_R}$
Consumul serviciilor interne EB, în %	$EB_{SpPp} + EB_{KPp} + EB_{gl}$		

Puterea pompei de alimentare: EB_{SpPp}[1]) iar pentru pompele principale de răcire sau ventilatoarele EB_{KPp} (în % din puterea instalată la bornele generatorului grupului).

Tabelul 5.1 (continuare)

Presiunea la intrarea în turbină, în at şi tipul reactorului	165	180	200	225	250	H_2O sub presiune	D_2O sub presiune [2]	Răcit cu CO_2
EB_{SpPp}, în %	2,6	2,9	3,2	3,5	3,9	1,35 – 1,45	aproximativ 1,5	aproximativ 2,7
EB_{KPp}, în %	–	–	–	–	–	1,8 – 2,5	aproximativ 1,1	7 – 12

Consumul serviciilor interne generale EB_{gl} [1] (inclusiv randamentul transformatorului pentru servicii interne)

Energia primară sau tipul de reactor	Lignit	Cărbune	Păcură	H_2O sub presiune	D_2O sub presiune [2]	Răcire cu CO_2
EB_{gl}, în %	4,1	3,0	2,4	1,2 – 2,2	aproximativ 2,6	3,0 – 3,5

Randamentul generatorului de abur: η_{DE} şi randamentul transmisiei η_R

Combustibilul sau tipul de reactor	Lignit	Cărbune uscat	Cărbune de calitate	Păcură	Vas de presiune	Conductă de presiune
η_{DE}	0,89	0,92	0,93	0,93	–	–
η_R	–	–	–	–	1,005 – 1,01	aproximativ 0,95

EB — alimentarea serviciilor interne;
EB_{gl} — alimentarea serviciilor interne generale;
EB_{KPp} — puterea pompelor principale de răcire sau ventilatoarelor;
EB_{SpPp} — puterea pompelor de alimentare
G_{ab} — debitul aburului viu, în kg/h;
G_{si} — debitul aburului prin supraîncălzitorul intermediar, în kg/h;
P_T — puterea la borne, în kW;
P_{SpT} — puterea turbopompei de alimentare, în kW;
P_{Eel} — puterea serviciilor interne ale centralei, în kW;
P_{TP} — puterea la arbore a turbinelor primare pentru pompe sau ventilatoare, în kW;
Q_{zuTu} — căldura furnizată ciclului apă-abur, raportat la turbină, în kcal/h;
Q_{DE} — căldura transmisă generatorului de abur, în kcal/h;
Q_R — căldura totală produsă în reactor, în kcal/h;
Q_P — căldura transmisă prin pompele principale de răcire sau ventilatoare;
Q_{RV} — pierderile de căldură ale reactorului, în kcal/h (v. tabelul 5.31, pag. 315);
i_{ab} — entalpia aburului viu, în kcal/kg;
i_{al} — entalpia apei de alimentare după preîncălzitorul final de înaltă presiune, în kcal/kg;
i_{ic2} — entalpia la intrarea în al doilea corp, în kcal/kg;
i_{ec1} — entalpia la ieşirea din primul corp, în kcal/kg;
η_{DE} — randamentul generatorului de abur;
η_V — randamentul conductei — pierderi prin radiaţie (0,99);
η_{tr} — randamentul transformatorului (0,99);
η_R — factor de transmisie a căldurii reactorului.

Metodă aproximativă pentru determinarea consumurilor specifice de abur şi de căldură prin utilizarea gradientului de temperatură „de calcul" H'_0 (neaplicabil în cazul separării mecanice a umidităţii şi supraîncălzirii intermediare a aburului).

Consumul specific de abur d pentru un grup turbogenerator fără supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere şi cu preîncălzire regenerativă este:

$$d = \frac{w_T}{i_{ab} - i_{al}} \text{ [kg/kWh].}$$

[1]) Valori aproximative pentru $P_{GRUP} > 100$ MW, pentru turbogrupuri cu condensaţie şi o singură supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere.
[2]) Construcţie integrată.

Influenţa preîncălzirii regenerative a apei de alimentare este inclusă în w_T; pentru eliminarea acesteia se introduce un consum specific de abur „fictiv“:

$$d' = \frac{w_T}{i_{ab} - i_c} \text{ [kg/kWh]},$$

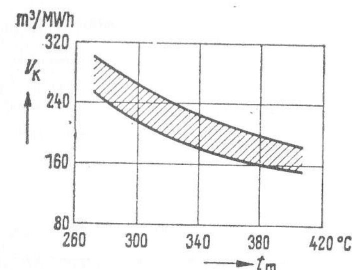


Fig. 5.4. Consumul specific de apă de răcire V_k raportat a puterea la bornele generatorului în funcţie de temperatura medie t_m a agentului de răcire al reactorului. Presiunea în condensator 0,05 ata, temperatura mediului de răcire 21°C.

în care:

w_T este consumul specific de căldură al grupului turbogenerator, în kcal/kWh;

i_{ab} — entalpia aburului viu, în kcal/kg;

i_{al} — entalpia apei de alimentare la intrarea în cazan, în kcal/kg;

i_c — entalpia condensatului la ieşirea din condensator, în kcal/kg.

Gradientul de temperatură „de calcul“ H_0' este:

$$H_0' = \frac{860}{d'\eta_T\,\eta_{gen}} \text{ [kcal/kg]},$$

în care:

η_T este randamentul intern al turbinei;

η_{gen} — randamentul generatorului.

Pentru instalaţiile cu o supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere:

$$d' = \frac{w_T}{i_{ab} - i_c + \Delta i_{si}}, \qquad H_0' = \frac{860}{d'\,\eta_{T\,med}\,\eta_{gen}},$$

în care: Δi_{si} este căldura adăugată în supraîncălzitorul intermediar, în kcal/kg;

η_{Tmed} — randamentul efectiv mediu al turbinei pentru partea de înaltă presiune, medie presiune şi joasă presiune (raportat la căderea totală de entalpie).

Pentru o instalaţie cu dublă supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere:

$$\Delta i_{si} = \Delta i_{si1} + \Delta i_{si2}.$$

Calcule aproximative pentru determinarea consumului specific de abur pentru o centrală cu şi fără supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere (neaplicabile în cazul separării mecanice a umidităţii şi al supraîncălzirii intermediare a aburului).

În formulele de mai jos, valabile pentru o centrală cu supraîncălzire intermediară a aburului, cu gaze de ardere, se consideră că prima priză se găseşte după partea de înaltă presiune.

Puterea totală de borne este:

$$P_T = P_{îp} + P_c + P_{pn}.$$

Pentru o centrală cu supraîncălzire intermediară a aburului cu gaze de ardere, echipată cu un grup cu două axe:

$$P_T = \frac{G_{ab}\,H_{oîp}\,\eta_{Tîp}\,\eta_{gen\,îp} + (G_c H_{omp} + \Sigma G_{pn} H_{opn})\,\eta_{Tmp}\,\eta_{gen\,mp}}{860},$$

din care se obţine debitul de abur condensat:

$$G_c = \frac{PT860\,(1 - f_2)}{(f_1 H_{oîp}\,\eta_{Tîp}\,\eta_{genîp}) + (H_{omp}\,\eta_{Tmp}\,\eta_{genmp})},$$

în care: $f_1 = G_{ab}/G_c$ şi $f_2 = P_{pn}/P_T$.

Consumul specific de abur condensat:

$$d_c = \frac{G_c}{P_T} = \frac{860(1 - f_2)}{(f_1 H_{oîp}\,\eta_{Tîp}\,\eta_{genîp}) + (H_{omp}\,\eta_{Tmp}\,\eta_{genmp})}.$$

Consumul specific de abur viu pentru un grup cu două axe, cu supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere:

$$d_{ab} = d_c f_1 = \frac{860(1 - f_2)f_1}{(f_1 H_{oîp}\,\eta_{Tîp}\,\eta_{genîp}) + (H_{omp}\,\eta_{Tmp}\,\eta_{genmp})}.$$

Consumul specific de abur viu, pentru un grup cu un ax, cu supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere (un singur generator)

$$d_{ab} = \frac{860(1 - f_2)f_1}{\eta_{gen}(f_1 H_{oîp}\,\eta_{Tîp} + H_{omp}\,\eta_{Tmp})}.$$

Consumul specific de abur viu pentru centrale fără supraîncălzire intermediară cu gaze de ardere, pentru grupuri cu un ax:

$$d_{ab} = \frac{860(1 - f_2)f_1}{H_{oîp}\,\eta_{Tîp}\,\eta_{gen}},$$

în care: d_{ab} este consumul specific de abur viu al turbogeneratorului, în kg/kWh;

d_c — consumul specific de abur condensat al turbogeneratorului, în kg/kWh;

G_{pn} — debitul de abur al prizei, în kg/h;

G_c — debitul de abur condensat, în kg/h;

G_{ab} — debitul de abur viu, în kg/h;

H_{opn} — căderea adiabatică de entalpie în prizele nereglabile, în kcal/kg:

$H_{oîp}$ — căderea adiabatică de entalpie în partea de înaltă presiune, înainte de supraîncălzirea intermediară, în kcal/kg;

H_{omp} — căderea adiabatică de entalpie, în părţile de medie presiune şi de joasă presiune, după supraîncălzirea intermediară sau căderea totală în părţile de înaltă presiune, medie presiune şi joasă presiune pentru instalaţiile fără supraîncălzire intermediară, în kcal/kg;

P_{pn} — puterea în prizele de abur nereglabile după supraîncălzirea intermediară, în kW;

$P_{îp}$ — puterea părţii de înaltă presiune, în kW;

P_T — puterea la bornele generatorului electric, în kW;

P_c — puterea produsă de debitul de abur condensat, după supraîncălzirea intermediară, în kW;

$\eta_{Tîp}$ — randamentul intern efectiv al părţii de înaltă presiune a turbinei înainte de supraîncălzirea intermediară;

η_{Tmp} — randamentul intern efectiv al părţilor de înaltă presiune şi joasă presiune, după supraîncălzirea intermediară, sau al părţilor de înaltă, medie, şi joasă presiune pentru cazul fără supraîncălzire intermediară;

η_{gen} — randamentul generatorului (indicii *îp* şi *mp* pentru părţile de înaltă, respectiv medie şi joasă presiune).

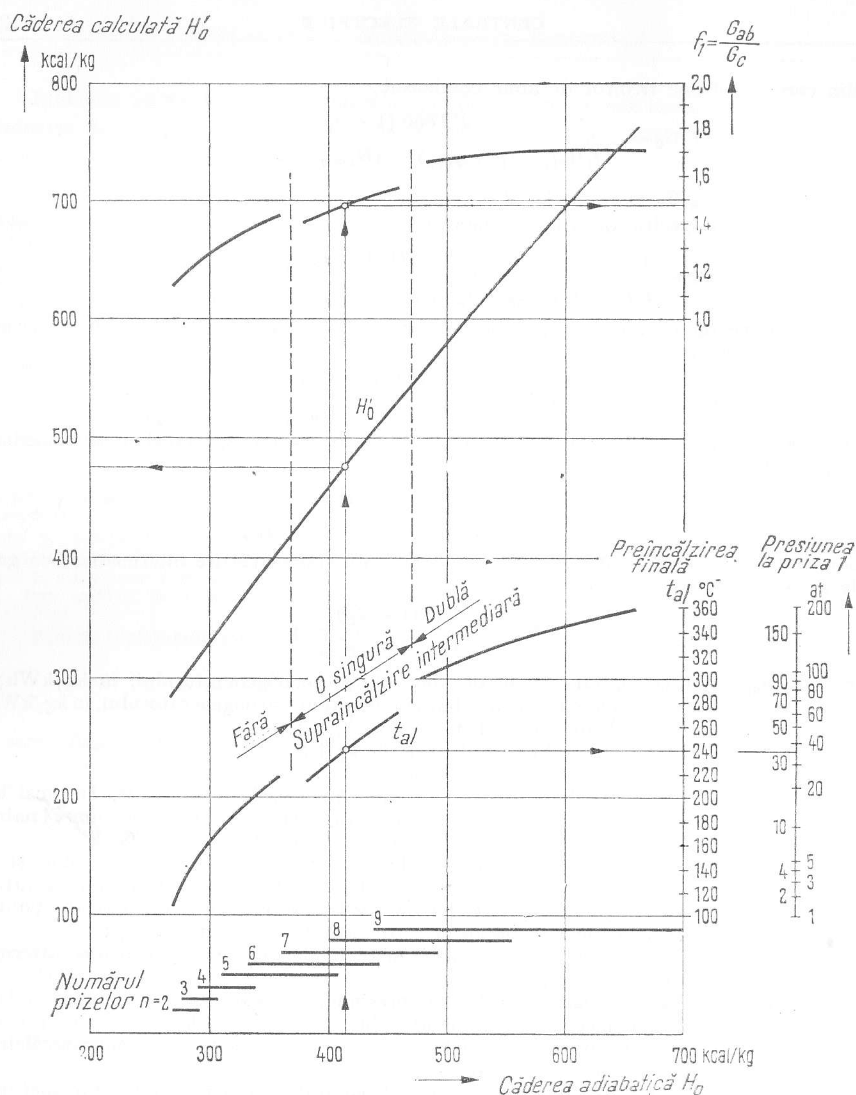


Fig. 5.5. Relația dintre căderea adiabatică H_0 și căderea calculată H_0':

Parametrii aburului viu	at	38	55	100	140	180	150	300
	°C	420	450	525	525	560	560	560
Prima treaptă de supraîncălzire	°C	—	—	—	525	560	560	560
A doua treaptă de supraîncălzire	°C	—	—	—	—	—	—	560.

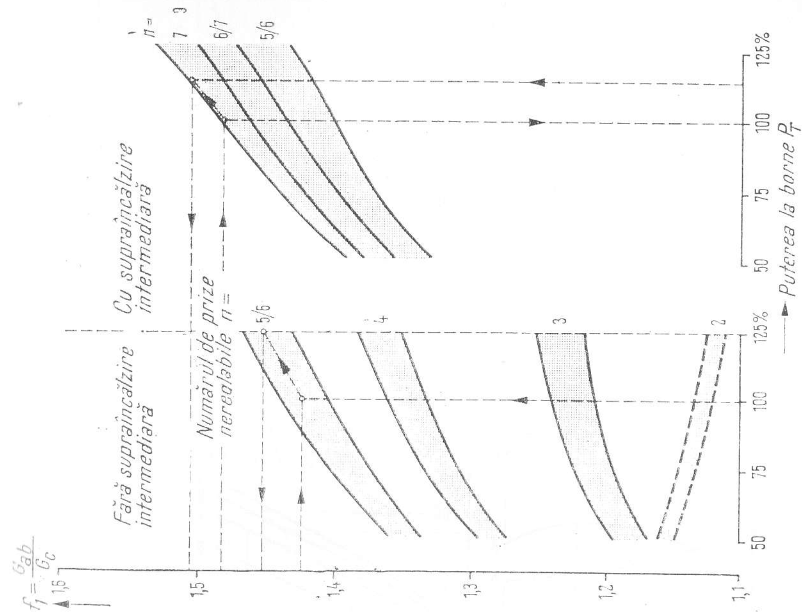


Fig. 5.7. Relația dintre debitul de abur viu și debitul de condensat f_1 în funcție de sarcină pentru centrala cu și fără supraîncălzire intermediară și pentru parametri constanți ai aburului viu:
—— variabilă; - - - constantă } entalpia finală a apei de alimentare.

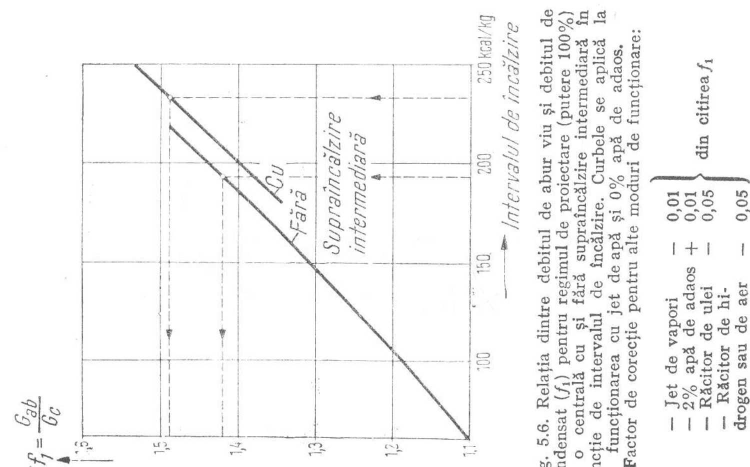


Fig. 5.6. Relația dintre debitul de abur viu și debitul de condensat (f_1) pentru regimul de proiectare (putere 100%) la o centrală cu și fără supraîncălzire intermediară în funcție de intervalul de încălzire. Curbele se aplică la funcționarea cu jet de apă și 0% apă de adaos.
Factor de corecție pentru alte moduri de funcționare:

- Jet de vapori − 0,01
- 2% apă de adaos + 0,01
- Răcitor de ulei − 0,05
- Răcitor de hidrogen sau de aer − 0,05

} din citirea f_1

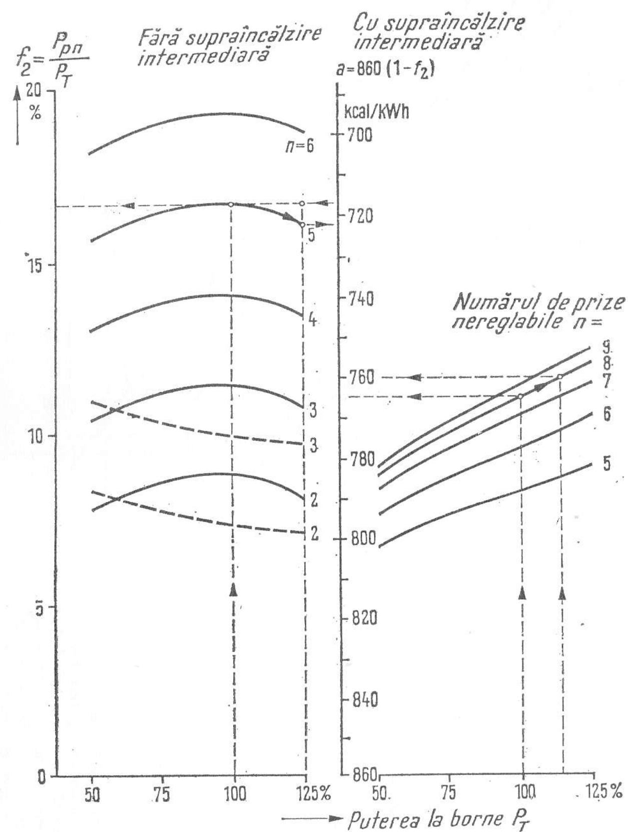
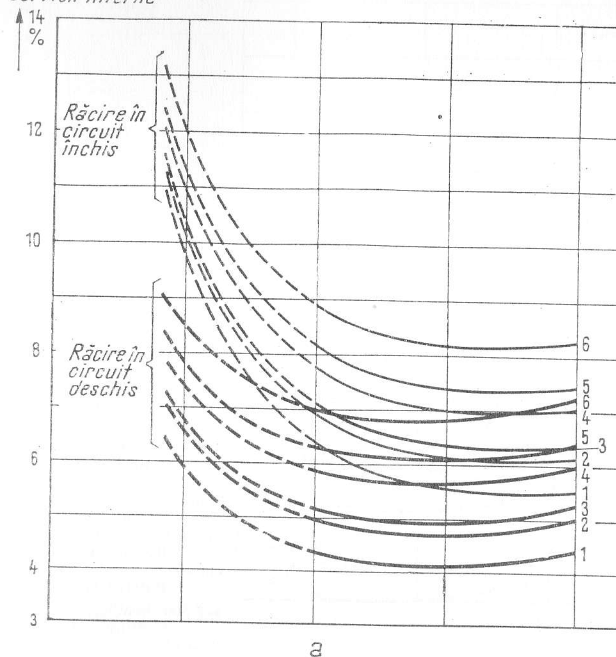


Fig. 5.8. Puterea prizelor nereglabile raportată la puterea totală, f_2, în funcţie de sarcină pentru centrala cu şi fără supraîncălzire intermediară şi pentru parametri constanţi ai aburului viu.
—— variabilă } entalpia finală a apei de alimentare
- - - constantă }



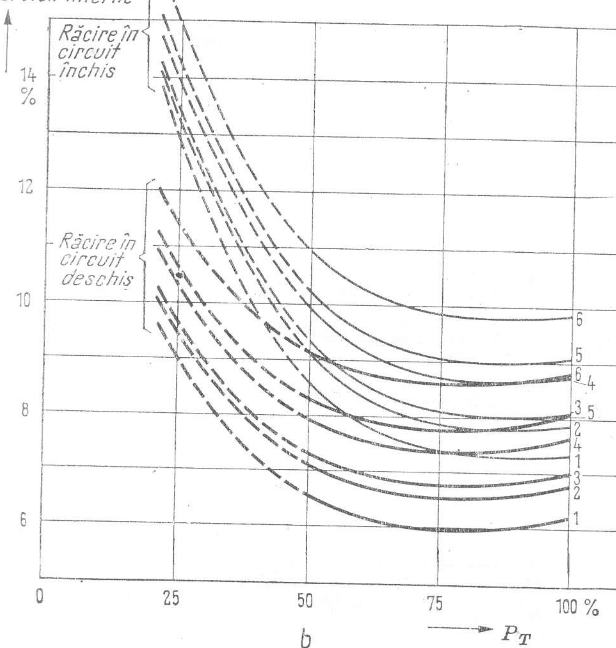
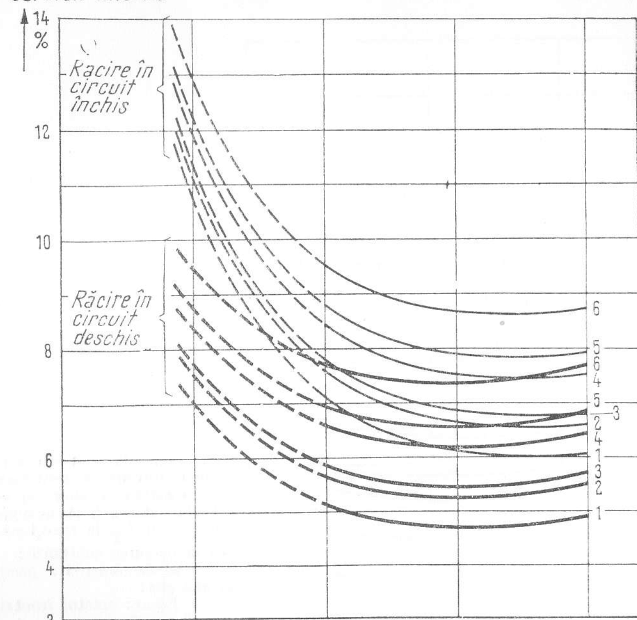


Fig. 5.9. Puterea serviciilor interne la centralele termoelectrice cu abur raportată la puterea la bornele generatorului P_T la funcţionarea la presiune constantă:

a) Combustibil: păcură sau gaz:
Focar: arzător frontal, lateral sau de tavan;
Putere calorică: H_i = = 9 600 kcal/kg.

b) Combustibil: lignit;
Focar: arzător frontal, lateral sau de tavane;
Evacuarea cenuşii: uscată;
Puterea calorică: H_i = = 2 000 kcal/kg;
Conţinut de cenuşă A = = 4%;
Conţinut de materii volatile: V = 50% (cărbune curat).



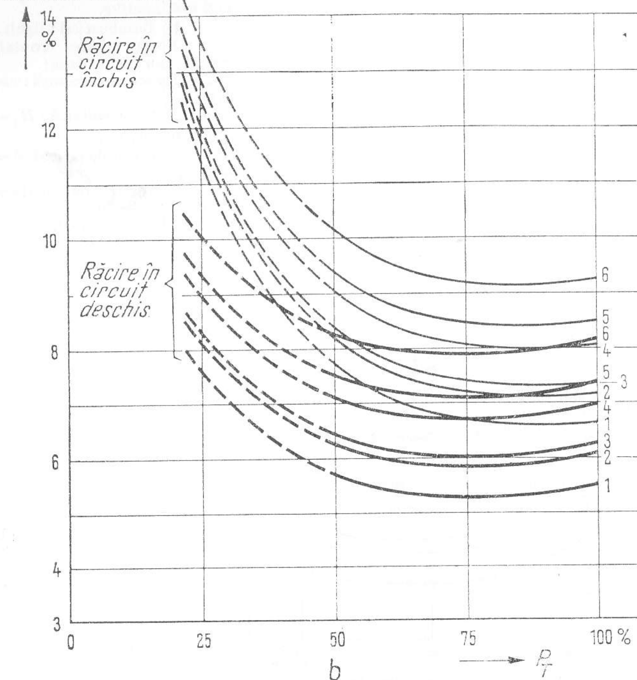
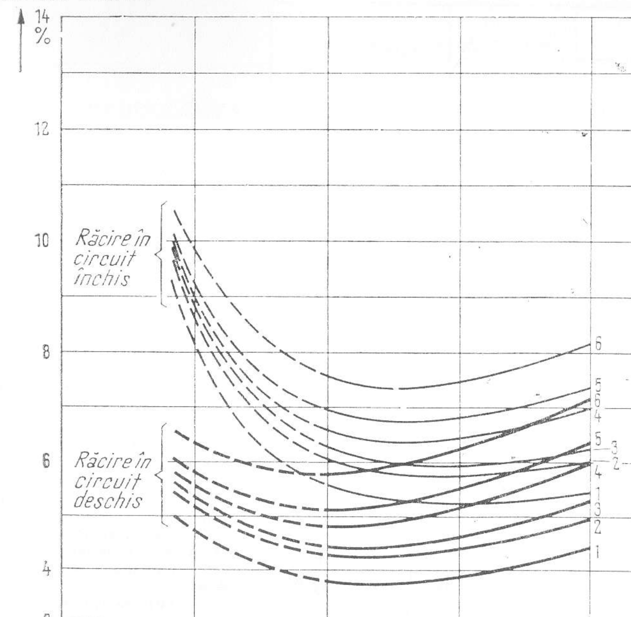


Fig. 5.10. Puterea serviciilor interne la centralele termoelectrice cu abur, raportată la puterea la bornele generatorului P_T, la funcționarea la presiune constantă:

a) Combustibil: cărbune;
Focar: arzător, frontal, lateral sau de tavan;
Evacuarea cenușii: lichidă;
Puterea calorică: $H_i = 7\,500$ kcal/kg;
Conținut de cenușă: $A = 6\%$;
Conținut de materii volatile: $V = 25\%$ (cărbune curat);

b) **Combustibil: cărbune;**
Focar: ciclon — orizontal;
Evacuarea cenușii: lichidă;
Puterea calorică: $H_i = 7\,500$ kcal/kg;
Conținut de cenușă: $A = 6\%$;
Conținut de materii volatile: $V = 25\%$ (cărbune curat).



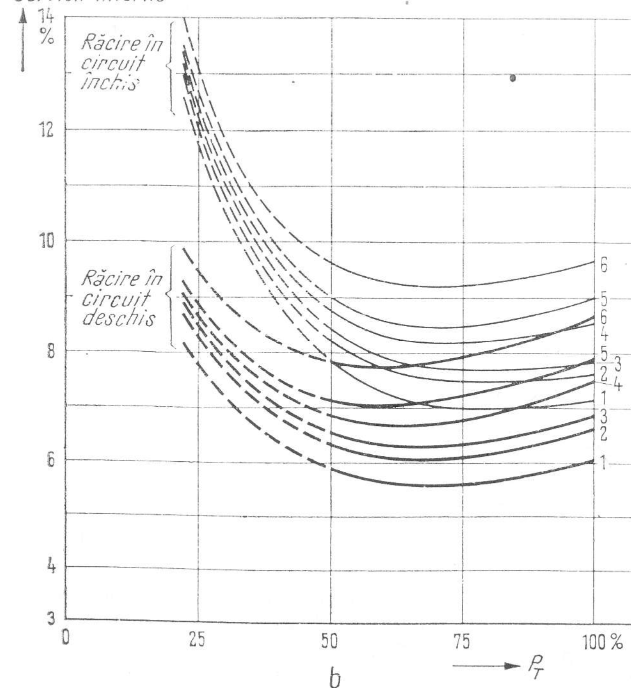
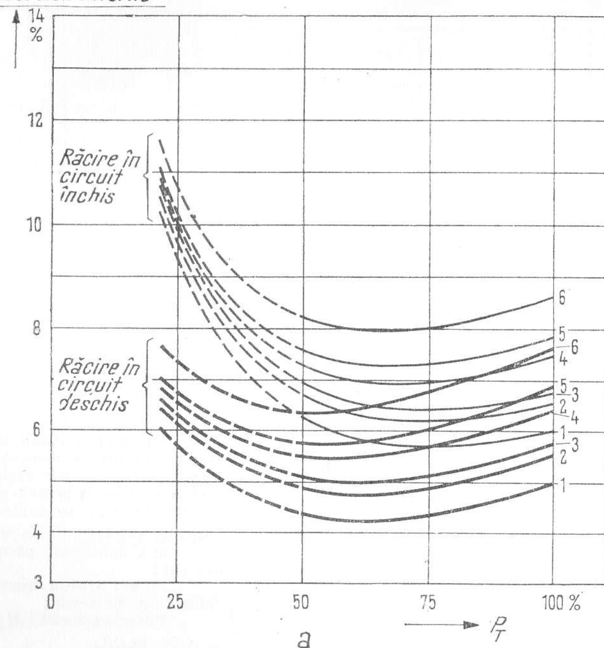


Fig. 5.11. Puterea serviciilor interne la centralele termoelectrice cu abur raportată la puterea la bornele generatorului P_T, la funcționarea la presiune variabilă:

a) Combustibil: **păcură** sau gaz;
Focar: arzător frontal, lateral sau de tavan;
Puterea calorică: $H_i = 9\,600$ kcal/kg.

b) Combustibil: **lignit;**
Focar: arzător frontal, lateral sau de tavan;
Evacuarea cenușii: **uscată;**
Puterea calorică: $H_i = 2\,000$ kcal/kg;
Conținut de cenușă $A = 4\%$;
Conținut de materii volatile: $V = 50\%$ (cărbune curat).



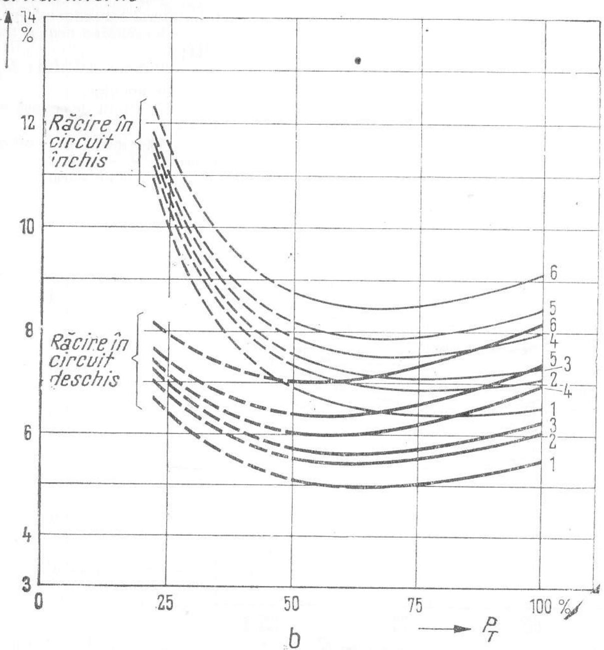


Fig. 5.12. Puterea serviciilor interne la centrale cu abur raportată la puterea la bornele generatorului P_T, la funcționarea la presiune variabilă:
a) Combustibil: cărbune;
Focar: arzător frontal, lateral sau de tavan;
Evacuarea cenușii: lichidă;
Puterea calorică: $H_i = 7\,500$ kcal/kg;
Conținut de cenușă: $A = 6\%$;
Conținut de materii volatile: $V = 25\%$ (cărbune curat);
b) Combustibil: cărbune;
Focar: ciclon — orizontal;
Evacuarea cenușii: lichidă;
Puterea calorică: $H_i = 7\,500$ kcal/kg;
Conținut de cenușă: $A = 6\%$;
Conținut de materii volatile: $V = 25\%$ (cărbune curat).

5.2. PRODUCEREA ABURULUI CU COMBUSTIBILI CLASICI

Tabelul 5.2. Puterile calorice ale combustibililor lichizi

Tipul	Densitatea g/ml	Compoziția %					Puterea calorifică kcal/kg	
		C	H	O	N	S	superioară H_s	inferioară H_i
Păcuri								
Extra ușoară (EU)	0,840	85,9	13,0	0,4	0,4	0,7	10 880	10 200
Ușoară (U)	0,880	85,5	12,5	0,8	0,8	1,2	10 700	10 050
Medie (M)	0,920	85,3	11,6	0,6	0,6	2,5	10 350	9 725
Grea (G)	0,970	84,0	11,0	1,11	0,39	3,5	10 200	9 600
Extra grea (EG)	—	—	—	—	—	—	—	9 200
Gudroane	1,02—1,10	89,8	6,5	1,7	1,2	0,8	9 300	9 000

Tabelul 5.3. Caracteristicile unor combustibili gazoși

Tipul	Densitatea [1]) kg/m³	Compoziția, în % din volum									Puterea calorifică kcal/kg	
		CO	H_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_2H_4	H_2S	CO_2	N_2	superioară H_S	inferioară H_i
Gaz natural												
SUA (California)	0,850	—	—	86,8	7,2	4,3	—	—	0,5	—	10 900	9860
SUA (Texas, epurate)	0,775	—	—	89,8	2,3	—	—	—	0,2	7,7	8930	8030
Germania (Bentheim)	0,754	—	—	93,2	0,6	—	—	—	—	6,2	8960	8060
Austria	0,751	—	0,7	94,7	1,8	0,2	—	—	1,4	1,2	9380	8440
Italia (Cortemaggiore)	0,766	—	—	91,8	5,1	—	—	—	—	3,1	9590	8630
Franța (Lacq, brut)	1,034	—	—	69,52	3,20	1,42	—	15,30	9,60	—	8740	7900
Franța, (Lacq, pur) ..	0,746	—	—	95,9	3,2	0,5	—	—	—	0,4	9780	8800
Sahara (Hassi R'Mel)	0,928	—	—	81,3	6,8	2,3	—	—	0,5	4,8	11 040	9990
URSS (Saratov)	0,772	—	—	93,1	2,5	1,5	—	—	0,6	2,3	9640	8680
Gaz de iluminat (amestecat)	0,591	21,5	51,5	17,0	—	—	2,0	—	4,0	4,0	4140	3710
Gaz de apă	0,705	40,0	50,0	0,3	—	—	—	—	5,0	4,7	2760	2520
Gaz de furnal	1,287	31,0	2,3	0,3	—	—	—	—	9,0	57,4	1035	1020

1) Volumul, în m³, la $t = 0°C$ și $p = 760$ mm Hg.

Tabelul 5.4. Puterile calorice ale unor combustibili solizi

Combustibili solizi	Raportat la material fără apă și cenușă								Conținutul de apă în cărbunele brut	Conținut de apă	Conținut de cenușă în cărbunele brut	Conținut de cenușă	Puterea calorică, în kcal/kg (în cărbunele brut)	
	Componenți volatili	C	H	O	N	S	Puterea calorică, în kcal/kg							
							superioară	inferioară	Valori medii		Valori medii		superioară	inferioară
	%	%	%	%	%	%	H_s	H_i	%	kg/kg	%	kg/kg	H_s	H_i
Lignit														
Halle-Bitterfeld	57,5	71,9	5,6	18,3	0,8	3,4	7125	6830	15,1	0,2057	11,5	0,1567	5230	4925
Schwandorf	55,25	63,63	5,10	26,08	1,27	3,92	6049	5780	53,1	1,5436	12,5	0,3634	2081	1678
Rhineland	55	68,3	5,0	27,5	0,5	0,5	6300	6037	60,0	1,6086	2,7	0,0724	2350	1900
Yallourn	51,4	67,58	4,76	26,86	0,54	0,26	6152	5900	66,5	2,0336	0,8	0,0245	2012	1540
Fohnsdorf	47,2	72,5	5,4	17,5	17,5	4,6	7270	6986	9,0	0,1268	20,0	0,2817	5162	4623
Moscova	46	67,5	5,2	19,5	1,3	6,5	6750	6476	33,0	0,7143	20,8	0,4502	3119	2799
Cărbune bituminos														
Bavaria	52	73,9	5,5	15,0	1,4	4,2	7365	7075	10,0	0,1299	13,0	0,1688	5671	5389
Cărbune cu ardere în aer liber														
Illinois, Madison	46,7	77,0	5,4	10,6	1,3	5,7	7850	7566	12,5	0,1673	12,8	0,1714	5864	5579
Scoția	41,5	81,4	5,4	10,3	2,1	0,8	8111	7327	13,8	0,1691	4,6	0,0564	6619	6306
West Midlands	39,6	80,5	5,5	11,9	1,4	0,7	7883	7593	8,6	0,0994	4,9	0,0566	6819	6518
Cărbune de Ruhr (nuci)	36,8	82,84	5,15	9,34	1,78	0,89	8203	7932	4,5	0,0503	6,0	0,0670	7342	7073
Cărbune mărunt de Saar	36,6	85,00	5,42	7,24	1,22	1,21	8412	8127	9,0	0,1084	8,0	0,0964	6982	6693
Cărbune de gaz														
Yorkshire	34,4	82,3	5,2	8,0	1,7	0,8	8600	8326	2,0	0,0219	6,8	0,0746	7843	7581
Cărbune mărunt de Ruhr	33,7	85,91	5,51	6,20	1,63	0,75	8417	8127	9,0	0,1084	8,0	0,0964	6986	6694
Pennsylvania, Fayette	33,4	85,55	5,23	6,24	1,52	1,46	8579	8304	3,9	0,0450	9,5	0,1097	7429	7168
Virginia, Dickenson	31,2	87,38	5,30	4,58	1,70	0,44	8608	8329	3,2	0,0351	5,6	0,0614	7850	7577
Durham	29,4	87,8	5,3	4,6	1,4	0,9	8700	8421	2,6	0,0287	6,9	0,0762	7874	7606
Cărbune gras														
Cărbune de Ruhr (nuci)	27	86,88	4,80	5,82	1,58	0,92	8548	8295	4,5	0,0503	6,0	0,0670	7650	7398
Cărbune mărunt de Rhur	24,4	88,70	4,90	4,14	1,60	0,66	8636	8378	9,0	0,1084	8,0	0,0964	7168	6901
Cărbune de forjă														
Cărbune de Rhur (nuci)	15,4	90,20	4,33	3,22	1,58	0,67	8645	8417	4,8	0,0539	6,2	0,0697	7694	7463
Cărbune greu														
Cărbune de Rhur (nuci)	12,4	90,70	3,98	2,52	1,50	1,30	8644	8434	4,5	0,0503	6,0	0,0670	7736	7522
Cărbune mărunt de Ruhr	10,5	90,85	3,84	2,73	1,74	0,84	8614	8412	9,0	0,1084	8,0	0,0964	7150	6929
Antracit														
Cărbune de Rhur (nuci)	7,7	91,80	3,56	2,55	1,38	0,71	8576	8389	4,5	0,0503	6,0	0,0670	7676	7482
Pennsylvania (Schuylkill)	2,45	93,67	2,34	2,30	0,80	0,89	8314	8191	2,8	0,0324	10,8	0,1250	7183	7061

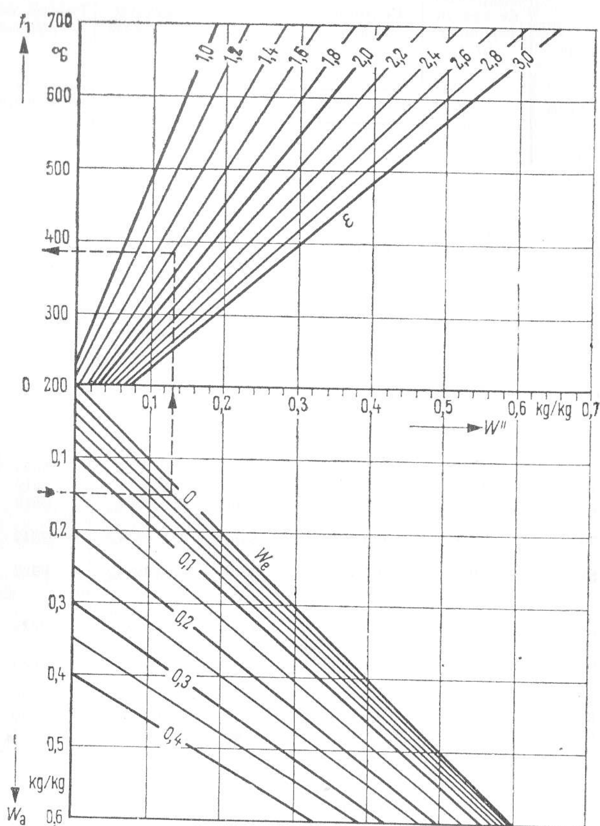


Fig. 5.13. Cărbune uscat cu aer uscat. Temperatura vaporilor $t_2 = 100°C$; la altă temperatură t, temperatura inițială a aerului este

$$t_1' = t_1 + (t_2' - 100)(1 + 1{,}3/\varepsilon) \ldots °C;$$

W_a — conținutul inițial de apă al cărbunelui brut, în kg/kg;
W_e — conținutul final de apă raportat la cărbunele uscat, în kg/kg;
W'' — conținutul de apă extrasă raportat la cărbunele brut, în kg/kg;
ε — proporția de gaze-cărbune, în kg/kg cărbune brut;
t_1 — temperatura necesară pentru aerul morii, în °C.

Exemplu: $W_a = 0{,}15$ kg/kg;
$W_e = 0{,}2$ kg/kg;
$W'' = 0{,}133$ kg/kg;
$\varepsilon = 1{,}6$ kg/kg $\rightarrow t_1 = 390°C$.

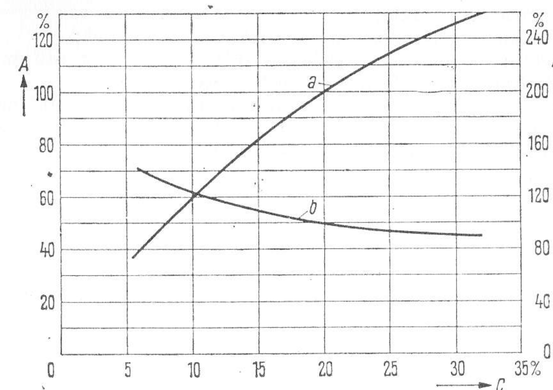


Fig. 5.14. Încărcarea şi puterea specifică a morii în funcție de calitatea cărbunelui pentru mori cu turație joasă: A — încărcarea morii (debit maxim) pentru a; a — încărcarea morii; B — puterea specifică pentru b; b — puterea; C — finețea de măcinare. Restul pe sita 0,09 mm.

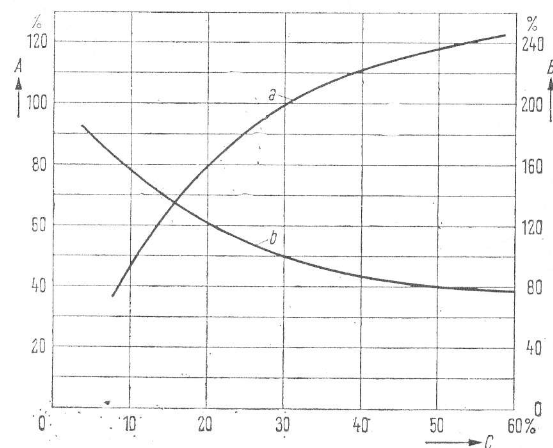


Fig. 5.15. Încărcarea şi puterea specifică a morii în funcție de calitatea cărbunelui pentru mori cu turație ridicată: A — încărcarea morii (debit maxim) pentru a; a — încărcarea morii; B — puterea specifică pentru b; b — puterea: C — finețea măcinării. Restul pe sită 0,09 mm.

Determinarea volumelor de aer şi de gaze de ardere [1])

S-au folosit următoarele relaţii:

L_{min} — volumul minim de aer, în m³/kg sau m³/m³;
V_{min} — volumul minim de gaze de ardere, în m³/kg sau m³/m³;
V_L — volumul real de aer, în m³/kg sau m³/m³;
V_g — volumul real de gaze de ardere, în m³/kg sau m³/m³;
H_i — puterea calorică inferioară, pentru combustibili solizi şi lichizi, în kcal/kg, iar pentru combustibili gazoşi, în kcal/m³;
n — excesul de aer.

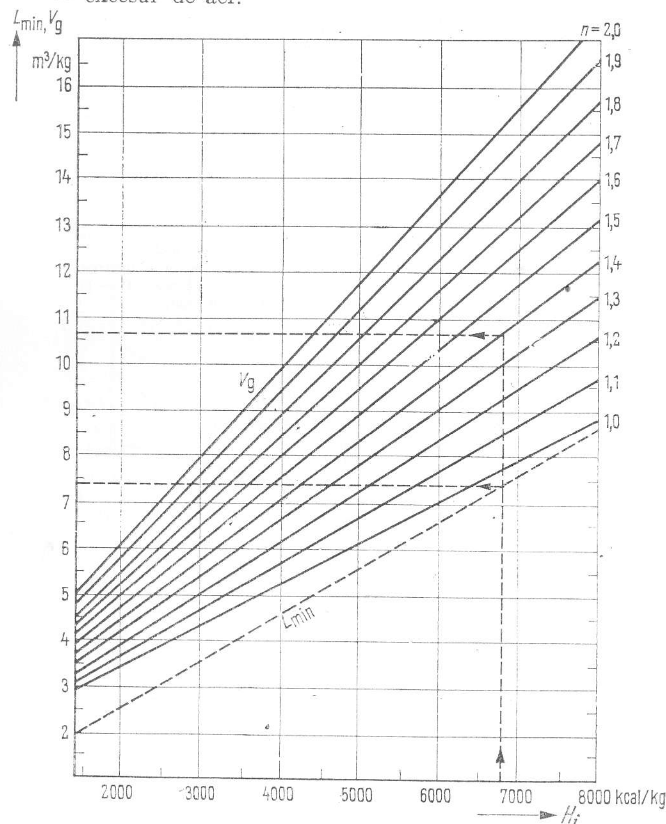


Fig. 5.16. Volumele de aer şi de gaze de ardere pentru combustibilii solizi:
Exemplu: H_i = 6 800 kcal/kg:
n = 1,4;
L_{min} = 7,4;
V_L = 1,4 × 7,4 = 10,3;
V_g = 10,7.

[1]) Volumele, în m³, la t = 0°C şi p = 760 mm Hg.

Tabelul 5.5. **Necesarul de aer şi volumul de gaze de ardere pentru combustibilii solizi**

Excesul de aer n	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Cărbune .... CO_2	18,85	17,2	15,75	14,5	13,4	12,6	11,8	11,1	10,4	9,8	9,3
Lignit .... CO_2	19,25	17,5	16,0	14,8	13,8	12,8	12,0	11,3	10,7	10,2	9,6

Pentru combustibili solizi:

$$L_{min} = \frac{H_i + 550}{990} \text{ [m}^3\text{/kg]};$$

$$V_{min} = \frac{0{,}898H_i + 1\,634}{990} \text{ [m}^3\text{/kg]}.$$

Pentru păcură:

$$L_{min} = \frac{H_i - 1\,115}{808} \text{ [m}^3\text{/kg]};$$

$$V_{min} = \frac{1{,}25H_i - 3\,052}{808} \text{ [m}^3\text{/kg]}.$$

Pentru gaz de cocs:

$$L_{min} = 1{,}088 \frac{H_i}{1\,000} - 0{,}239 \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]};$$

$$V_{min} = 0{,}486 + 1{,}085 \frac{H_i}{1\,000} \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}.$$

Pentru gaz de furnal:

$$L_{min} = 0{,}866 \frac{H_i}{1\,000} - 0{,}614 \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]};$$

$$V_{min} = 0{,}929 + 0{,}715 \frac{H_i}{1\,000} \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}.$$

Pentru gaz natural:

$$L_{min} = 1{,}142 \frac{H_i}{1\,000} - 0{,}251 \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]};$$

$$V_{min} = 0{,}526 + 1{,}173 \frac{H_i}{1\,000} \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}.$$

Pentru gaz de generator:

$$L_{min} = 0{,}996 \frac{H_i}{1000} - 0{,}173[\mathrm{m^3/m^3}];$$

$$V_{min} = 0{,}7575 + 0{,}9026 \frac{H_i}{1000} [\mathrm{m^3/m^3}].$$

Tabelul 5.6. Necesarul de aer şi volumul de gaze de ardere pentru combustibili gazoşi şi lichizi

Excesul de aer *n*		1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
Gaz de furnal	CO_2	24,8	23,7	22,7	21,8	21,0	20,2	19,4	18,8	18,1	17,6	17,0
Gaz de generator	CO_2	19,3	18,1	16,9	16,0	15,1	14,3	13,6	13,0	12,4	11,9	11,4
Gaz de apă	CO_2	19,6	17,9	16,6	15,4	14,6	13,7	12,9	12,2	11,5	10,9	10,4
Gaz de cocs	CO_2	10,3	9,3	8,5	7,8	7,2	6,7	6,2	5,8	5,5	5,2	4,9
Păcură	CO_2	15,7	14,2	12,9	11,9	11,0	10,2	9,6	9,0	8,5	8,0	7,6

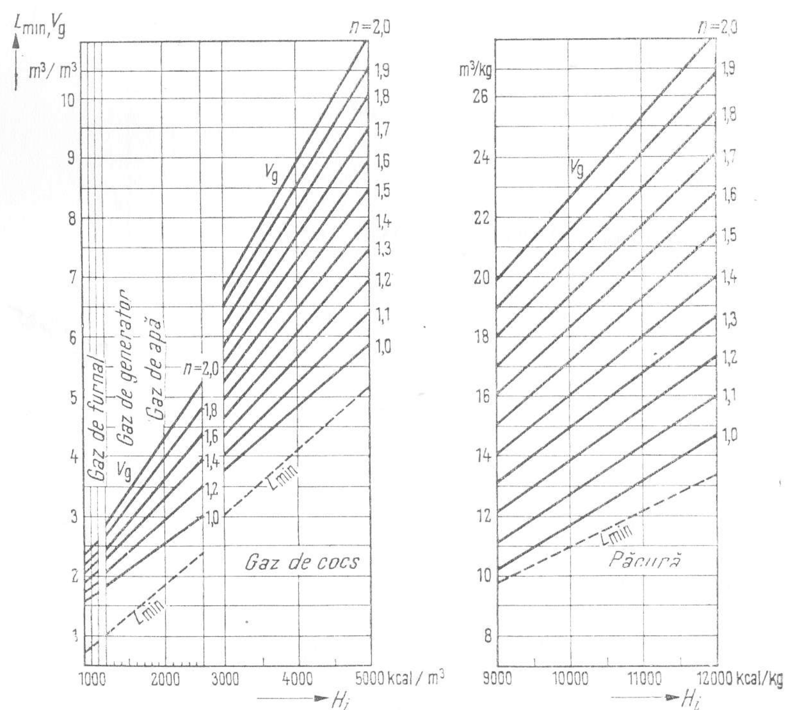


Fig. 5.17. Volumele de aer şi de gaze de ardere pentru combustibilii lichizi şi gazoşi (vezi legenda la pag 256).

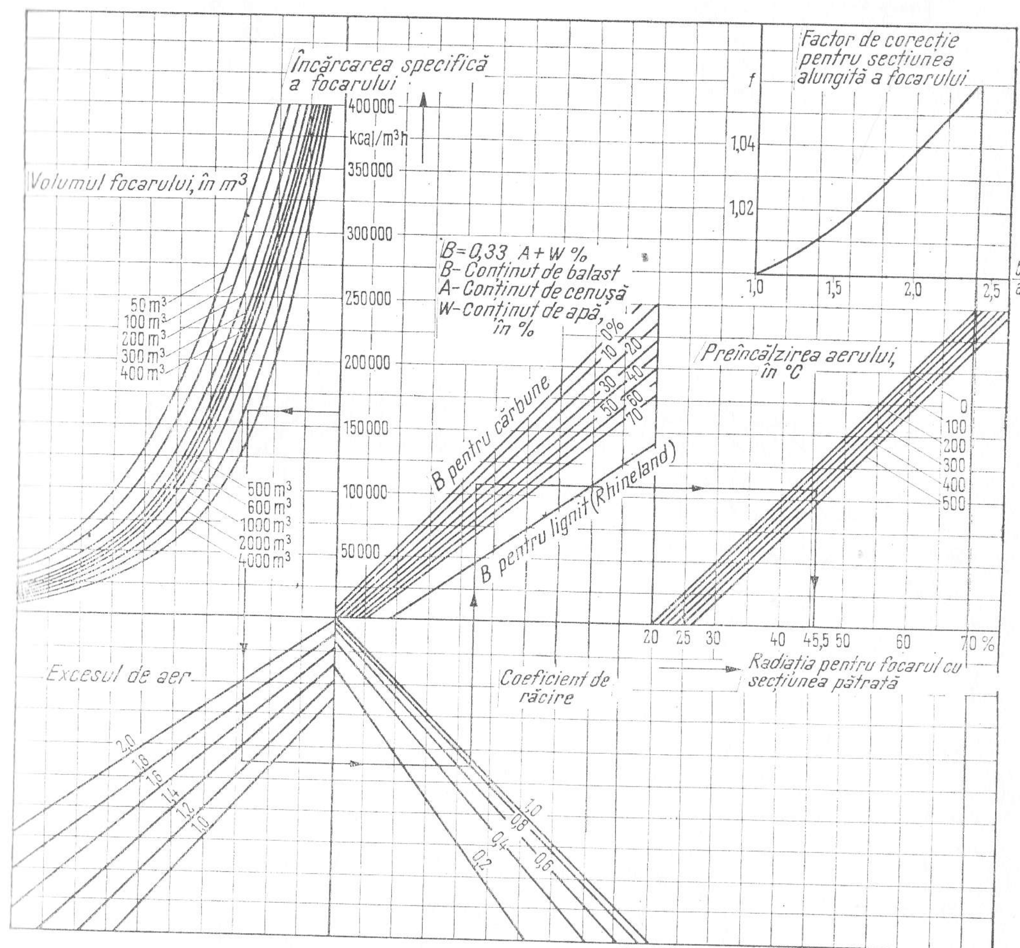


Fig. 5.18. Diagramă pentru determinarea radiaţiei în focar:
b — latura mare a dreptunghiului; *a* — latura focarului pătrat la acelaşi volum.

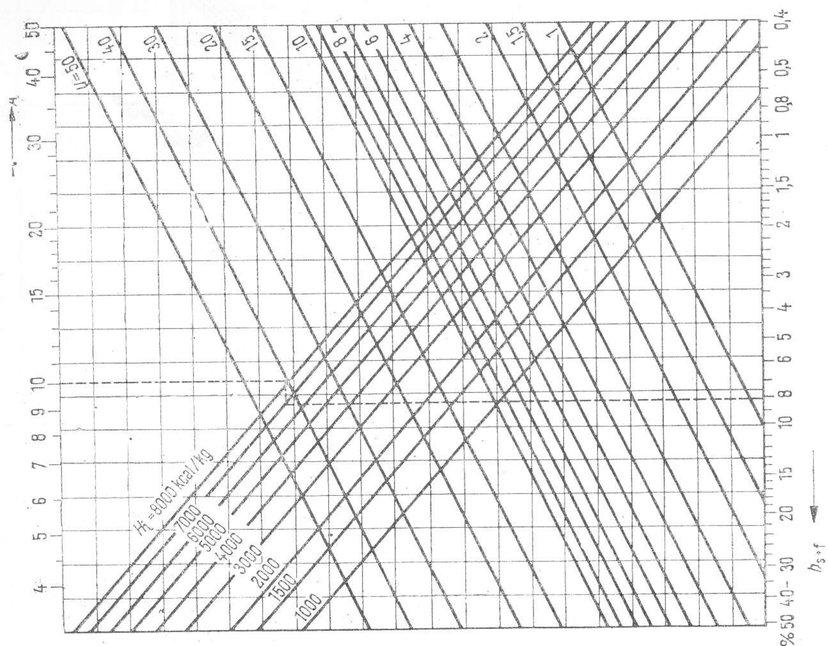


Fig. 5.19. Pierderile h_{s+f} datorite particulelor nearse în cenușă

Exemplu:

$$h_{s+f} = \frac{7\,900\ Au}{(100\text{-}u)\ H_i} = \frac{7\,900 \times 10 \times 41}{(100-41)\ 6\,800} = 8{,}09\%$$

Conținutul de cenușă al cărbunelui A = 10%

Particule nearse în cenușă și antrenate cu gazele de ardere n = 41%.

Puterea calorică inferioară H_i = 6 800 kcal/kg.

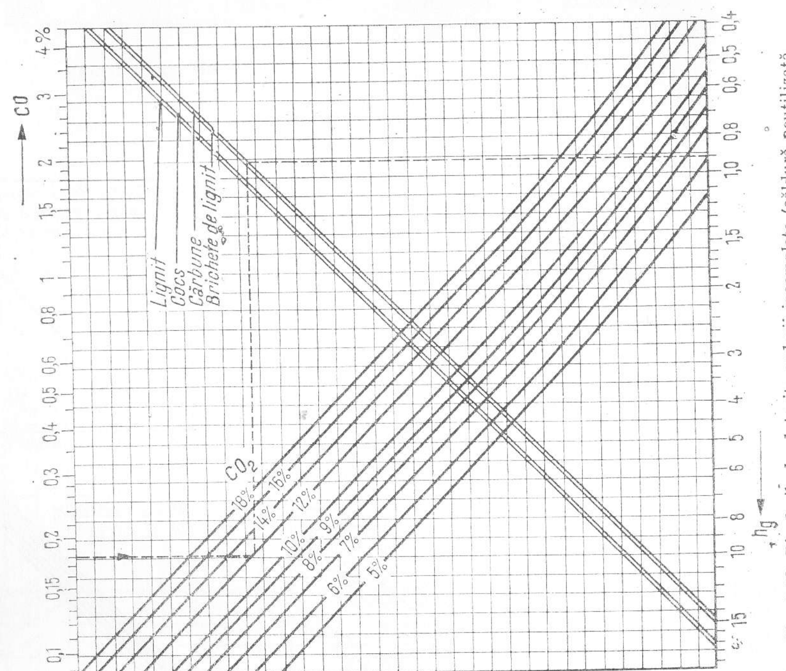


Fig. 5.20. Pierderile h_g datorite arderii incomplete (căldură neutilizată.

Exemplu:

Conținut de CO în gazele de ardere CO = 0,18%

Conținut de CO_2 în gazele de ardere CO_2 = 12%

Combustibil = cărbune.

Pierderea datorită arderii incomplete 0,92%.

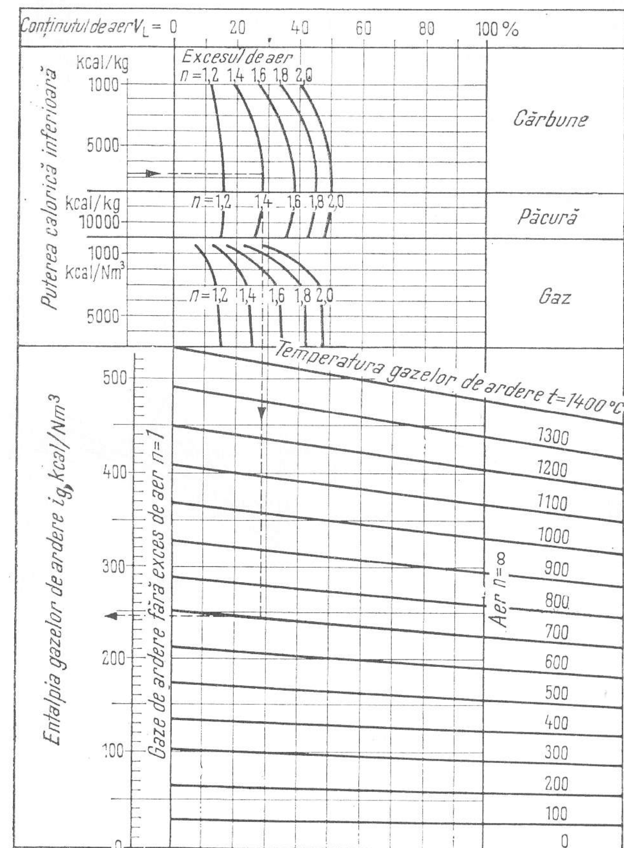


Fig. 5.21. Entalpia, temperatura și conținutul de aer din gazele de ardere.

Unitatea de măsură kcal/Nm³ = 1m³ la 760 mm Hg și 20°C

Exemplu:

Cărbune, H_i = 6800 kcal/kg;

Excesul de aer n = 1,4;

Temperatura gazelor de ardere t = 700°C;

Entalpia gazelor de ardere: i_g = 245 kcal/m³.

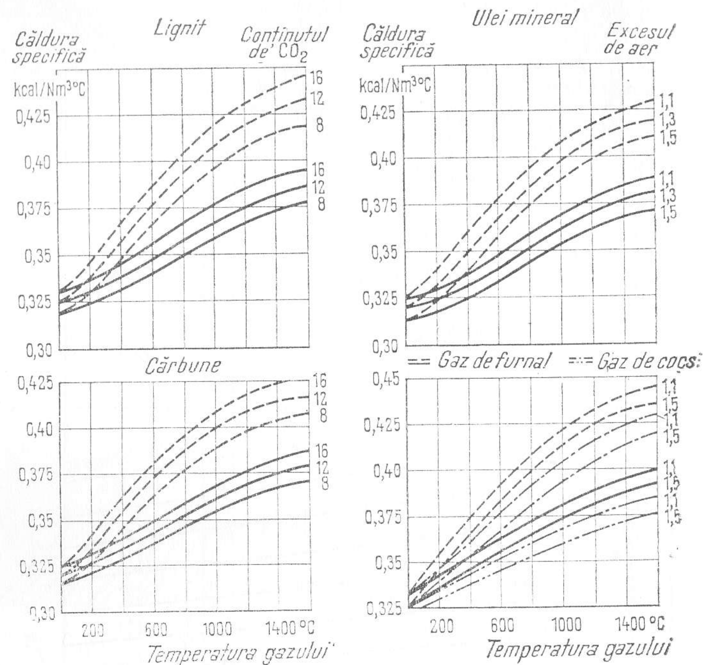


Fig. 5.22. Căldura specifică reală C_p şi căldura specifică medie C_{pm} a gazelor de ardere.

°C	Căldură specifică reală C_p				Căldură specifică medie C_{pm}			
	N_2 şi CO	O_2	CO_2	H_2O	N_2 şi CO	O_2	CO_2	H_2O
0	0-310	0,312	0,384	0,356	0,310	0,312	0,384	0,356
100	0,312	0,319	0,432	0,361	0,310	0,316	0,408	0,359
200	0,315	0,329	0,467	0,371	0,312	0,320	0,429	0,362
300	0,321	0,340	0,501	0,382	0,314	0,325	0,447	0,367
400	0,327	0,350	0,526	0,394	0,317	0,330	0,463	0,373
500	0,334	0,358	0,546	0,407	0,319	0,334	0,477	0,379
600	0,341	0,365	0,564	0,420	0 323	0,339	0,491	0,385
700	0,348	0,371	0,578	0,434	0,326	0,343	0,501	0,391
800	0,354	0,375	0,589	0,447	0,329	0,347	0,511	0,397
900	0,359	0,380	0,598	0,460	0,332	0,350	0,521	0,403
1 000	0,364	0,383	0,607	0,472	0,335	0,353	0,529	0,409
1 200	0,371	0,390	0,618	0,494	0,340	0,359	0,442	0,422
1 4 0	0,377	0,395	0,627	0,513	0,345	0,365	0,553	0,433

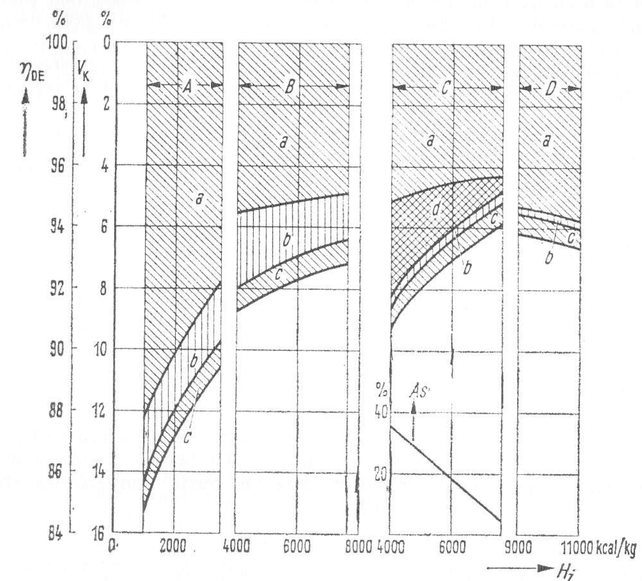


Fig. 5.23. Randamentul η_{DE} pierderile V_k ale generatoarelor de abur şi conţinutul de cenuşă *As:*
A — lignit; *B* — cărbune, evacuarea uscată a cenuşii; *C* — cărbune distilat; *D* — păcură; *a* — pierderi prin gaze evacuate;
b — pierderea la aprindere; *c* — pierderi prin conducţie şi radiaţie; *d* — pierderi prin particule nearse în cenuşă.
Pierderea prin gaze evacuate se bazează pe următoarele temperaturi:
150 — 160°C — cazane cu lignit;
120 — 130°C — cazane cu cărbune, cu evacuarea uscată a cenuşii;
110 — 120°C — păcură distilată;
130 — 150°C — păcuri sulfuroase.

5.3. TURBINE CU ABUR

Tipuri de turbine cu abur

Turbinele cu acţiune au paletele rotorului prinse pe roţi, ultimele fiind montate pe un arbore sau prelucrate prin forjare dintr-un arbore unitar. Paletele statorului formează ajutaje menţinute în poziţie de diafragme sectorizate fixate de carcasă.

Căderea termică totală de-a lungul unei trepte de acţiune a unei turbine este transformată în viteză prin intermediul paletelor statorului, astfel încît presiunea este aceeaşi înaintea şi după roata turbinei. Turbinele cu reacţiune au palete mobile montate pe un tambur sau rotor rigid, paletele statorului fiind prinse fie direct de carcasă, fie cu ajutorul unor dispozitive de fixare speciale. Căderea de presiune este transfor-

mată în viteză, în mod egal sau neegal, de către paletele rotorului, care au aceeaşi secţiune, astfel încît presiunea în faţa unui şir de palete ale rotorului este mai mare decît în spatele lui (fig. 5.24).

Trebuie notat că mărirea puterii unitare a grupurilor, creşterea parametrilor iniţiali ai aburului şi supraîncălzirea intermediară tind să micşoreze diferenţa dintre cele două tipuri de bază.

Numărul de trepte depinde de căderea termică totală care urmează a fi transformată de turbină, fiind determinat de parametrii de intrare şi de ieşire ai aburului. Considerente economice impun o presiune ridicată la intrare şi supraîncălzire intermediară a aburului după un anumit număr de trepte. Pentru randamente optime, căderile mari de entalpie necesită trepte numeroase, care trebuie amplasate în mai multe corpuri. Arborii individuali ai turbinei şi rotorul generatorului sînt cuplaţi rigid.

Turbinele de abur cu condensaţie sînt utilizate mai ales pentru producerea de energie electrică. Căldura latentă de vaporizare a aburului este evacuată în apa de răcire în condensator, unde nu mai este utilă economic, datorită temperaturii sale scăzute. În Germania, temperaturile apei de răcire (circulaţie) sînt cele ce urmează: 8–12°C la răcirea în circuit deschis, 24–25°C în turnuri de răcire cu tiraj natural, 21–22°C în turnuri de răcire cu tiraj artificial; pentru o temperatură a termometrului umed de 12°C.

Turbinele cu condensaţie cu mai multe corpuri de mare putere sînt fabricate pentru parametri înalţi şi foarte înalţi (170–250 at şi 520–565°C). Temperatura de supraîncălzire intermediară este egală sau depăşeşte cu puţin temperatura aburului viu.

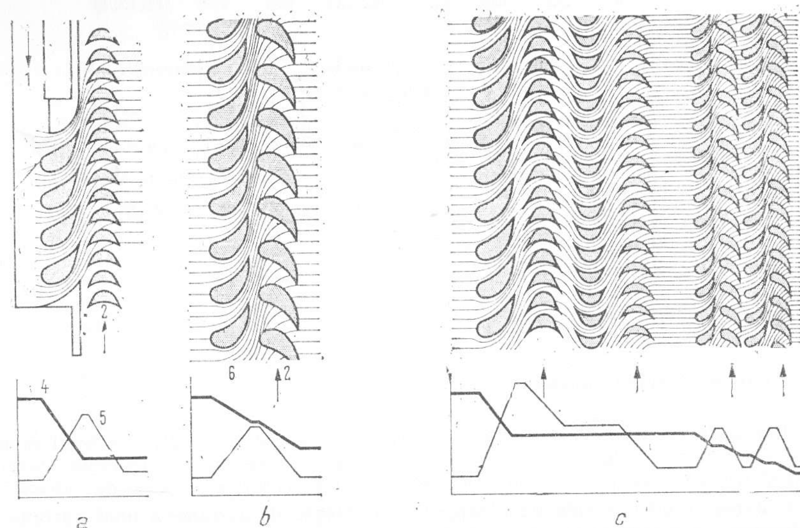


Fig. 5.24. Curgerea aburului în treptele turbinei de acţiune, reacţiune şi mixte: *a* — treaptă de acţiune; *b* — treaptă de reacţiune; *c* — treaptă mixtă de viteză şi treaptă de reacţiune; *1* — intrarea aburului; *2* — palete mobile; 3 — ajutaje; *4* — presiunea aburului; *5* — viteza aburului; *6* — palete fixe.

Limita pentru grupurile cu un singur ax, care sînt practic singurele potrivite pentru condiţiile din Europa, este în prezent de circa 1000 MW, utilizînd răcirea în circuit deschis. În cazuri speciale presiunile la intrare au fost totuşi peste 300 at, iar temperaturile pînă la 650°C; cîteva instalaţii au fost, de asemenea, construite pentru dublă supraîncălzire intermediară. Parametrii aburului peste 250 at şi 565°C impun utilizarea materialelor austenitice, costul lor ridicat făcînd aceste maşini discutabile din punct de vedere economic. Ca atare, alegerea lor se limitează la cazuri speciale.

Turbinele cu contrapresiune sînt utilizate în industrie unde există totdeauna o cerere simultană de putere şi căldură. După destindere şi lucru în turbină, aburul este furnizat unui proces tehnologic. Acoperirea cererilor simultane de putere şi căldură din industrie de către centrale pentru producerea combinată a energiei electrice şi căldurii (centrale de termoficare), reprezintă cea mai eficientă transformare a proprietăţilor calorice ale combustibilului. Puterea turbinei este determinată în principal de cerinţele de abur ale procesului tehnologic şi numai într-o mai mică măsură de parametrii aburului viu (controlul contrapresiunii).

Turbinele cu contrapresiune şi prize reglabile de abur sînt utilizate în industrie atunci cînd trebuie să se alimenteze două circuite de abur la presiuni diferite. Turbina este echipată cu două rînduri de vane de control, fiecare acţionată de cîte un regulator de presiune. Şi în acest caz puterea turbinei este determinată de cererea de abur a procesului tehnologic.

Turbinele de abur cu condensaţie şi prize reglabile de abur pot fi privite ca o combinaţie a unei părţi fără condensaţie şi a unei părţi cu condensaţie. Ambele părţi pot fi amplasate fie în carcase separate, fie în aceeaşi carcasă. Presiunea prizei reglabile de unde aburul este prelevat pentru procesul tehnologic este menţinută constantă de un ansamblu de vane de control montate între cele două secţiuni. La o alimentare constantă cu abur, partea cu condensaţie poate fi supusă unor sarcini variabile de către sistemul de prelevare de abur, astfel încît acest tip de turbină poate acoperi necesităţile de abur şi de energie electrică ale unei fabrici în mod independent una faţă de cealaltă. Sistemele de control pentru aburul viu şi pentru priza reglabilă sînt întotdeauna interconectate în centralele moderne, adică presiunea şi variaţiile de putere acţionează simultan asupra celor două ansambluri de vane de control. Aceasta asigură un sistem mai stabil de control şi o reacţie mai rapidă.

Turbine pentru diverse aplicaţii. Turaţia cea mai ridicată pentru turbinele cuplate direct cu generatoarele de putere este la 50 Hz de 3 000 rot/min, iar la 60 Hz (ca de exemplu în S.U.A) de 3 600 rot/min. Turbinele proiectate pentru debite volumetrice mai scăzute, care funcţionează economic la turaţii mai ridicate (pînă la 18 000 rot/min) trebuie să fie prevăzute, prin urmare, cînd antrenează generatoare, cu un angrenaj reductor de turaţie. Cuplarea directă, cu turaţii peste 3 000 rot/min este în prezent frecvent adoptată pentru pompele de alimentare; în mod similar, pentru turbocompresoare în industria petrochimică şi în industria de îngrăşăminte, puterea ajungînd pînă la 25 MW.

Calculul de bază pentru turbinele cu abur

Fig. 5.25 reprezintă diagrama de stare pentru o turbină cu abur în diagrama *i-s*. *A* este originea destinderii determinată de presiunea p_1 şi temperatura t_1. *AB* corespunde destinderii adiabatice pînă la contrapresiunea p_2. Punctele *A* şi *B* reprezintă anumite valori ale entalpiei i_1 şi i_2 în diagrama *i-s*. $H_0 = i_1 - i_2$ reprezintă deci căderea izen-

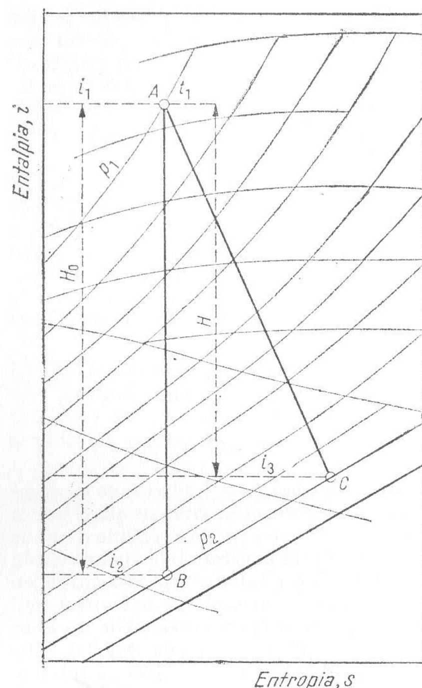


Fig. 5.25. Destinderea aburului la turbina cu condensaţie în diagrama i, s.

tropică de entalpie, din care rezultă puterea teoretică a turbinei pentru un debit de abur de 1 kg. În practică destinderea are loc după politropa AC, rezultînd entalpia finală i_3, datorită entropiei mărite.

Notaţiile utilizate în relaţiile de calcul sînt cele care urmează (v. şi fig. 5.25):

i_1 — entalpia aburului la intrarea în turbină, în kcal/kg;
i_{Aip} — entalpia aburului la ieşirea din corpul de înaltă presiune, în kcal/kg;
i_p — entalpia aburului de priză, în kcal/kg;
i_{al} — entalpia apei de alimentare, în kcal/kg;
i_{si} — entalpia aburului după supraîncălzirea intermediară, în kcal/kg;
t_{sc} — temperatura aburului saturat la condensator, în °C;
G_p — debitul prelevat la priză reglabilă, în kg/h;
G_{ab} — debitul de abur viu, în kg/h;
G_c — debitul de condensat, în kg/h;
G_{si} — debitul aburului prin supraîncălzitorul intermediar, în kg/h;
H_0 — căderea izentropică de entalpie, în kcal/kg;
P — puterea la borne, în kW (echivalent caloric 860 kcal/kWh);
η_i — randamentul intern al turbinei, în %;
η_m — randamentul mecanic al turbinei, în %;
η_{gen} — randamentul generatorului, în %;
η_{red} — randamentul reductorului, în %.

Lucrul mecanic transformabil în putere şi transmis rotorului este:

$$H_t = i_1 - i_2 = H_0\eta_i.$$

Randamentul mecanic η_m ia în consideraţie frecarea în lagărele turbinei şi alte cîteva pierderi mecanice, astfel încît puterea pe kilogramul de abur, disponibilă la cuplă este:

$$P = \frac{G_{ab}}{860} H_0\eta_i\eta_m.$$

Inversa acestei relaţii dă consumul de abur d pe kWh la cuplă:

$$d = \frac{860}{H_0\eta_i\eta_m}\ [\text{kg/kWh}].$$

Produsul $\eta_i\eta_m = \eta_e$ este denumit randament al turbinei sau randament efectiv.

Tabelul 5.7. **Criterii pentru randamentul turbinelor**

	Randamentul	Turbină cu condensaţie	Turbină cu contrapresiune
Puteri mari (peste 50 MW)	η_i	0,83–0,87	–
Puteri medii	η_i	0,78–0,85	0,78–0,88
Puteri mari	η_m	0,98–0,995	
Puteri scăzute (mici)	η_m	0,95–0,99	
Cuplajul	η_m	0,97–0,98	

Consumuri specifice de abur şi de căldură

Consumul specific de abur raportat la bornele generatorului se obţine cu ajutorul randamentului generatorului η_{gen}:

$$d = \frac{860}{H_0\eta_e\eta_{gen}}.$$

Dacă există şi un reductor de turaţie, consumul specific devine:

$$d = \frac{860}{H_0\eta_e\eta_{red}\eta_{gen}}.$$

Figura 5.26 cuprinde o comparaţie între curbele de destindere pentru o centrală funcţionînd la 180 at cu o singură treaptă de supraîncălzire intermediară şi una funcţionînd la 250 at cu dublă supraîncălzire intermediară.

Consumul specific de căldură w_T este definit ca fiind cantitatea de căldură furnizată turbinei — prin aburul viu şi eventual prin supraîncălzirea intermediară — pe kWh produsă, minus cantitatea de căldură cedată apei de alimentare de către aburul de priză.

Consumul specific de căldură w_T (în kcal/kWh) se calculează astfel:

— pentru o turbină cu condensaţie:

$$w_T = \frac{G_{ab}(i_1 - i_{al})}{P};$$

— pentru o turbină cu supraîncălzire intermediară:

$$w_T = \frac{G_{ab}(i_1 - i_{al}) + G_{si}(i_{si} - i_{Aip})}{P};$$

— pentru o turbină cu condensaţie cu priză de abur fără prize nereglabile:

$$w_T = \frac{G_{ab}i_1 - (G_p i_p + G_c t_{sc})}{P};$$

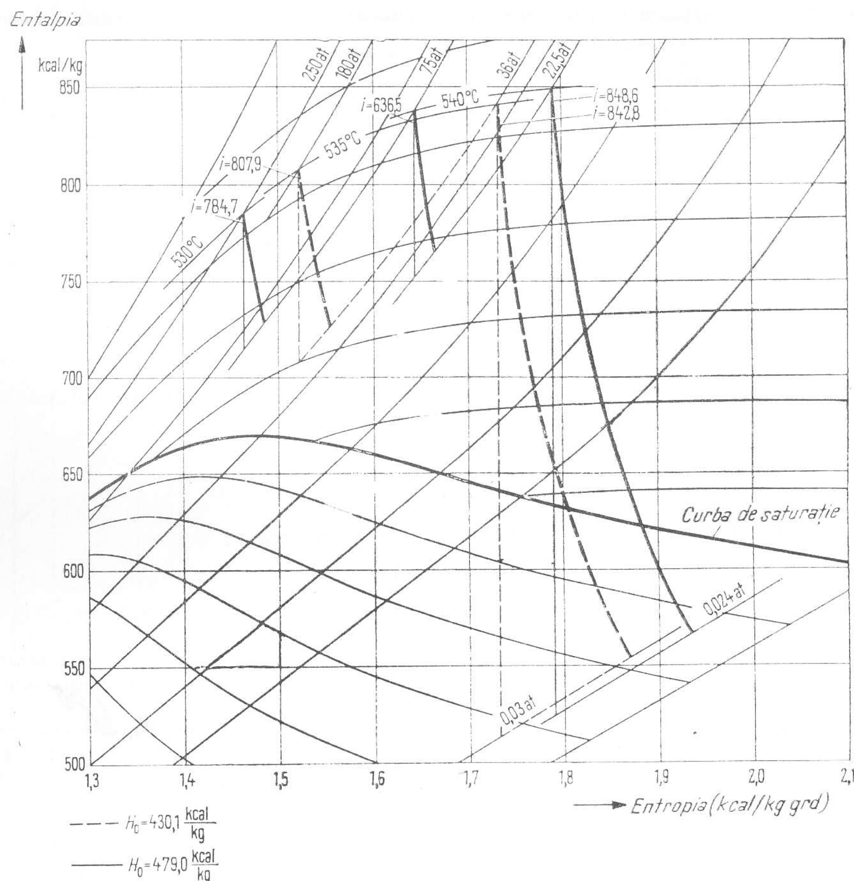


Fig. 5.26. Destinderea aburului cu parametrii 180 at/535/535°C și 250 at/530/540/54)°C în diagrama i, s:
- - - H_0 = 430,1 kcal/kg;
—— H_0 = 479,0 kcal/kg.

— pentru o turbină cu contrapresiune:

$$w_T = \frac{860}{\eta_m \cdot \eta_{red} \cdot \eta_{gen}} + \begin{cases}\text{pierderi pentru aburul de} \\ \text{etanșare și căldura radiată.}\end{cases}$$

Condensația

Tabelul 5.8. **Vidul aproximativ la intrarea condensatorului în ata, în funcție de temperatura de intrare a apei de răcire**

q =	60		80	
t_e =	12	20	12	27
g = 40	0,036–0,031	0,056–0,048	0,031–0,026	0,068–0,061
g = 60	0,039–0,033	0,059–0,051	0,034–0,029	0,072–0,064

q — Raportul dintre debitul de apă de circulație și debitul de abur condensat la punctul optim (de proiectare) (apă de rîu și răcire cu turnuri cu circulație: 70–80, răcire cu turnuri cu circulație forțată: 55–60).
t_e — Temperatura de intrare a apei de răcire în condensator, în °C.
g — Raportul dintre debitul de abur condensat și suprafața de răcire a condensatorului, în kg/m²h (încărcarea suprafeței de răcire).

Echipamentul auxiliar al turbinelor cu abur

Turnurile cu răcire uscată sînt adoptate dacă cantitatea de apă necesară pentru răcirea condensatorului nu este disponibilă ca apă proaspătă. Apa utilizată este circulată într-un sistem închis, după încălzirea în condensator ea trebuind răcită.

Turnurile de răcire (fig. 5.27) sînt preferate. Apa de răcire caldă cade sub formă de picături și este răcită prin circulația naturală, sau mai eficient, prin circulația forțată a aerului. Pierderile prin evaporare sînt de același ordin de mărime cu cele ale debitului de abur la condensator, la care trebuie adăugate pierderile prin stropire ale debitului de apă de răcire de aproximativ 0,5–1% și pierderile prin decantare. Aceste pierderi urmează a fi compensate printr-o cantitate corespunzătoare de apă de adaos.

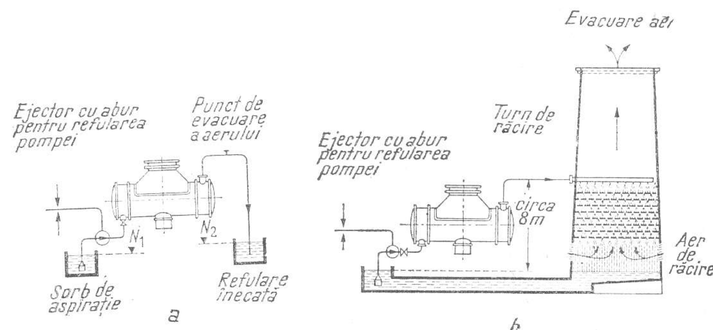


Fig. 5.27. Răcirea în circuit deschis și în circuit închis cu turnuri pentru turbinele cu abur inclusiv presiunile pompelor de apă de răcire:
a — utilizîndu-se apă proaspătă și sifonare, $N_2 \geqslant N_1$, înălțimea geodezică $h_g \geqslant 0$ înălțimea manometrică $h_{man} \approx$ 6 m; b — utilizîndu-se turn de răcire, înălțimea geodezică $h_g = N_2 - N_1 \approx$ 8 m, înălțimea manometrică $h_{man} \approx$ 12 m.

Tratamentul chimic al apei de adaos este în mod normal necesar pentru a se menţine duritatea şi conţinutul de săruri al apei de răcire sub nivelele admisibile.

Decarbonatarea înlătură atît bioxidul de carbon liber, cît şi cel dizolvat reducînd duritatea la aproximativ 2°dH (1°dH este un grad de duritate germană şi corespunde la 10 mg CaO la un litru de apă), apa trecînd în final printr-un filtru.

Dedurizarea intermediară prin procedeul de schimb cationic este adesea recomandabil, în special dacă apa brută conţine mult sulfat de calciu ($CaSO_4$); acesta reduce duritatea apei de adaos la sub 0,1°dH. Astfel se asigură o mai mare depunere a nămolului, creşterile ulterioare nemaifiind dependente de duritate ci de conţinutul total de săruri.

Dedurizarea prin schimb cationic de adaos este uneori adecvată, deşi nu se poate obţine o depunere tot atît de importantă de nămol ca în cazul decarbonatării prealabile, datorită alcalinităţii mai ridicate.

Dacă se utilizează *răcirea în circuit deschis* (v. fig. 5.27), de exemplu cu apă de mare (lac), pot fi acceptate valori superioare, cu condiţia utilizării unor materiale speciale.

Tabelul 5.9. **Date referitoare la apa de răcire**

		O singură circulaţie	Recirculată	
Temperatura peretelui	°C	< 60 – 80	< 60 – 80	> 100
Valoarea pH		> 7,0	> 7,0	> 7,0
CO_2 liber	mg/l	< 20	< 3,0	< 3,0
Duritatea carbonaţilor	°dH [1])	8 – 15[2])	4 – 15[2])	< 1
Duritatea necarbonaţilor	°dH [1])	< 50	< 80	< 1
Clor combinat (Cl)	mg/l	< 1000	< 1000	< 1000
Conţinutul total de săruri	mg/l	< 3000	< 3000	< 3000
Creşterea algelor		nu este permisă	nu este permisă	nu este permisă
Cu tratarea apei de adaos:				
Alcalinitatea totală	factorul *m*		< 15	< 15
La o duritate totală	°dH [1])		< 1	< 0,1

[1]) 1°dH (grad de duritate german) corespunde la 10 mg CaO în 1l de apă.
[2]) Valoarea maximă numai în prezenţa fosfaţilor polimeri.

În unele condensatoare, apa de răcire este înlocuită cu aer, ventilatoarele recirculînd aerul între elementele condensatorului. Aceste *condensatoare răcite cu aer* sînt instalate oriunde apa de adaos nu este suficientă.

5.4. DATE REFERITOARE LA CALCULUL COMPONENTELOR ŞI MATERIALELOR

Ventilatoare

Necesarul de putere este dat de relaţia:

$$P = \frac{GH_{vent}}{102\eta} = \frac{V_s \rho_s H_{vent}}{102\eta} = \frac{V_s p_{vent}}{102\eta}\, k \,[\text{kW}]$$

factorul de compresibilitate fiind:

$$k = p_{st1} \frac{1}{\Delta p_{st}} \frac{\varkappa}{\varkappa - 1} \left[\left(\frac{p_{st2}}{p_{st1}} \right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}} - 1 \right],$$

în care G este debitul masic, în kg/s;

H — presiunea de refulare, în m coloană de gaz:

$$H = \frac{k \Delta p_{st} + \Delta p_d}{\rho_s}$$

H_{vent} — presiunea de refulare a ventilatorului [1]), în m coloană de gaz, $H_{vent} \approx \frac{p_{vent}}{\rho_s} k$. Comparată cu diferenţa dintre presiunile statice Δp_{st}, diferenţa dintre presiunile dinamice Δp_d este mică, astfel încît factorul k se poate referi la diferenţa dintre presiunile totale;

k — factor de compresibilitate;

ρ — densitatea, în kg/m³;

p — presiunea totală, în mm H_2O;

p_{st} — presiune statică, în mm H_2O;

p_{vent} — presiunea ventilatorului, în mm H_2O;

V — debitul volumetric, în m³/s;

Δp_d — diferenţa dintre presiunile dinamice, în mm H_2O;

Δp_{st} — diferenţa dintre presiunile statice, în mm H_2O;

ρ_s — densitatea, în kg/m³;

η — randamentul ventilatorului;

$\varkappa$ — raportul căldurilor specifice (exponentul izentropic), $\varkappa = c_p/c_v$.

Mărimile înainte de ventilator au indicele 1 şi după ventilator, indicele 2.

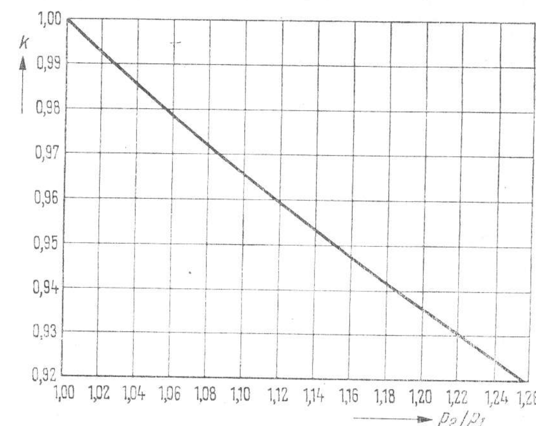


Fig. 5.28. **Factorul de compresibilitate.**

[1]) **Cînd se calculează puterea utilă a ventilatorului trebuie luată în considerare „comprimarea“ produsă la presiuni de refulare ridicate. Comprimarea este presupusă adiabatică. Schimbarea de stare adiabatică** $p v^{\varkappa}$ = const este utilizată ca bază pentru calculul puterii utile.

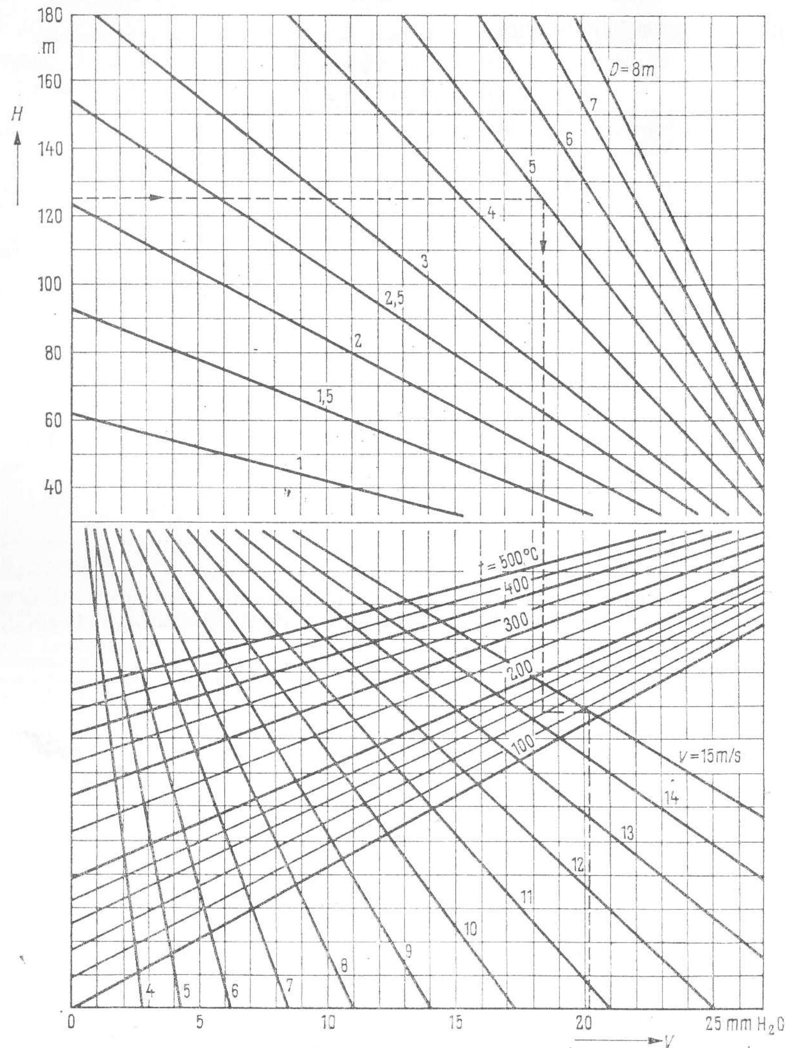


Fig. 5.29. Pierderile prin frecare și de evacuare în coșurile de fum: H — înălțimea coșului de fum; D — diametrul mediu al coșului; t — temperatura medie a gazelor arse; v — viteza medie a gazelor arse; V — pierderile de presiune.

Tabelul 5.10 **Densitatea gazelor de ardere cu compoziție medie și ale aerului cu umiditate medie**

Gazul de ardere la			Aerul la		
Temperatura °C	760 mmHg = 760 torr = 1 bar = 10,33 m H_2O kg/m³	735,56 mmHg = 1 at = = 10 m H_2O kg/m³	Temperatura °C	760 mmHg = 760 torr = 1 bar = 10,33 m H_2O kg/m³	735,56mmHg = 1 at = 10 m H_2O kg/m³
130	0,900	0,869	0	1,295	1,251
140	0,878	0,848	10	1,249	1,207
150	0,857	0,828	20	1,207	1,166
160	0,838	0,809	30	1,167	1,127
170	0,819	0,795	40	1,130	1,091
180	0,801	0,773	50	1,095	1,057
190	0,783	0,756	60	1,062	1,026
200	0,767	0,740	70	1,031	0,996

Pompe centrifuge

Notațiile pentru pompele centrifuge sînt:

A — înălțimea datorită presiunii la nivelul de aspirație, în m coloană de lichid;
c_a — viteza medie de ieșire, în m/s;
c_D — viteza medie a fluidului în conductele de refulare, în m/s;
c_S — viteza medie a fluidului în conductele de aspirație, în m/s;
D_1 — diametrul de intrare al rotorului, în mm;
e — înălțimea de refulare geodezică, în m coloană de lichid:

$$e = H_{S\,geod} + H_{D\,geod} \quad \text{sau} \quad e = H_{D\,geod} - H_{Z\,geod};$$

$e_{s\,extr}$ — înălțimea maximă geodezică de aspirație sau înălțimea geodezică minimă de alimentare, în m coloană de lichid;
f_H — coeficient de corecție pentru H la diferite viteze;
f_p — coeficient de corecție pentru P la diferite viteze;
f_Q — coeficient de corecție pentru Q la diferite viteze;
G — debitul, în t/h;
g — accelerația gravitației, $g = 9,81$ m/s²;
H — înălțimea totală de refulare a pompei, în m coloană de lichid;
$H_{D\,geod}$ — înălțimea datorită presiunii geodezice, în m coloană de lichid (diferența de înălțime dintre axul pompei — pentru pompele verticale nivelul minim al aspirației în rotor — și nivelul lichidului sau centrul secțiunii de evacuare pe partea de refulare);
H_{man} — înălțimea manometrică de refulare, în m H_2O (1m H_2O = 0,1 at);
$H_{S\,geod}$ — înălțimea geodezică de aspirație, în m coloană de apă (diferența dintre nivelul de aspirație și axul pompei sau nivelul minim al aspirației în rotor);
$H_{S\,max}$ — înălțimea de aspirație maximă admisibilă, în m coloană de lichid;
$H_t = \dfrac{10 p_t}{\rho}$ înălțimea de presiune a vaporilor mediului, în m coloană de lichid;

$H_{Z\,geod}$ — înălţimea geodezică de alimentare, în m coloană de lichid;
H_1 — înălţimea de refulare a pompei la diferite turaţii;
n — turaţia pompei, în rot/min;
n_1 — turaţia schimbată în rot/min;
P — puterea absorbită de pompă, în kW;
P' — puterea absorbită de pompă, în kW;
P_1 — puterea absorbită de pompă la diferite turaţii, în kW;
P_D — presiunea în conducta de refulare, în at;
p_S — presiunea în conducta de aspiraţie, în at;
p_t — presiunea de saturaţie a lichidului, în at;
p' — presiunea absolută la nivelul de aspiraţie, în ata;
p'' — presiunea absolută la nivelul de refulare, în ata;
Q — debitul, în m^3/h;
Q_1 — debitul pompei la diferite turaţii, în m^3/h;
y — diferenţa de înălţime între manometre, în m coloană de lichid;
Z — pierderile totale de presiune, în m coloană de lichid;
Z_s — pierderile de presiune în conducta de aspiraţie, în m coloană lichid;
η — randamentul pompei;
ρ — densitatea lichidului pompat, în t/m^3.

Calculul parametrilor pompelor centrifuge

Presiunea de refulare:

$$H_{man} = H\rho\,[mH_2O] \text{ sau } H_{man} = 0{,}1\,H\rho\,[at].$$

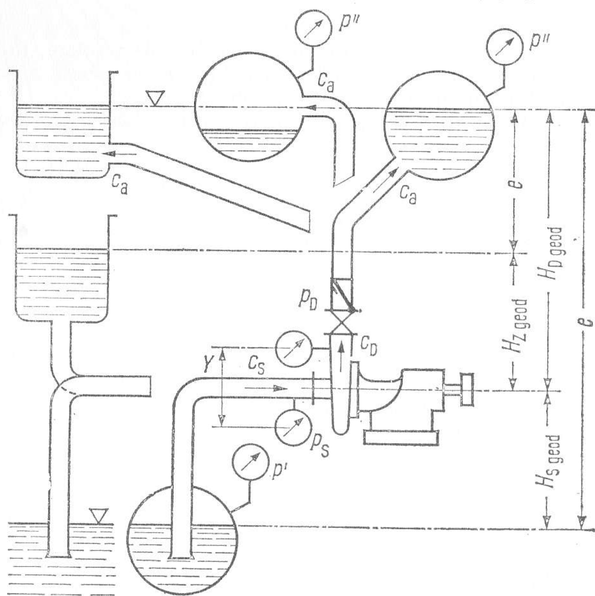


Fig. 5.30. Notaţii pentru presiuni şi înălţimi la pomparea lichidelor.

Înălţimea de refulare determinată prin măsurători este:

$$H = 10\,\frac{pD - p_s}{\rho} + y + \frac{c_D^2 - c_s^2}{2g}\ [\text{m coloană lichid}].$$

Înălţimea de refulare este:

$$H = e + \frac{10(p'' - p')}{\rho} + z\ [\text{m coloană de lichid}].$$

Puterea P absorbită de pompă poate fi calculată cu ajutorul înălţimii de refulare şi debitului:

$$P = \frac{\rho Q H}{3{,}6 \times 102\eta},$$

sau raportat la greutate:

$$P = \frac{GH}{3{,}6 \times 102\eta}.$$

Relaţiile regimurilor de funcţionare ale pompelor centrifuge sînt:

$$Q_1 = \left(\frac{n_1}{n}\right) Q.$$

$$H_1 = \left(\frac{n_1}{n}\right)^2 H,$$

$$P_1 \approx \left(\frac{n_1}{n}\right)^3 P.$$

Înălţimile de aspiraţie sau de poziţie pentru pompe centrifuge.

Presiunea pozitivă:

$$\Delta h = \frac{10p'}{\rho} - H_{S\,max} - \frac{10p_t}{\rho}.$$

Presiunea pozitivă la presiunea barometrică normală şi apa la 18°C: (formulă aproximativă):

$$\Delta h = 10 - H_{s\,max}.$$

Înălţimea datorită presiunii la nivelul de aspiraţie:

$$A = \frac{10p'}{\rho} = \frac{10p_t}{\rho} + \Delta h + \frac{c_s^2}{2g} + \frac{D_1}{2} + Z_s + e_{s\,extr}.$$

Înălţimea pozitivă netă de aspiraţie

$$\Delta h_{ges} = \Delta h + \frac{c_s^2}{2g} + \frac{D_1}{2}.$$

Înălţimea de aspiraţie maximă sau înălţimea de poziţie minimă:

$$e_{s\,extr} = \frac{10p'}{\rho} - \frac{10pt}{\rho} Z_s - \Delta h_{ges}.$$

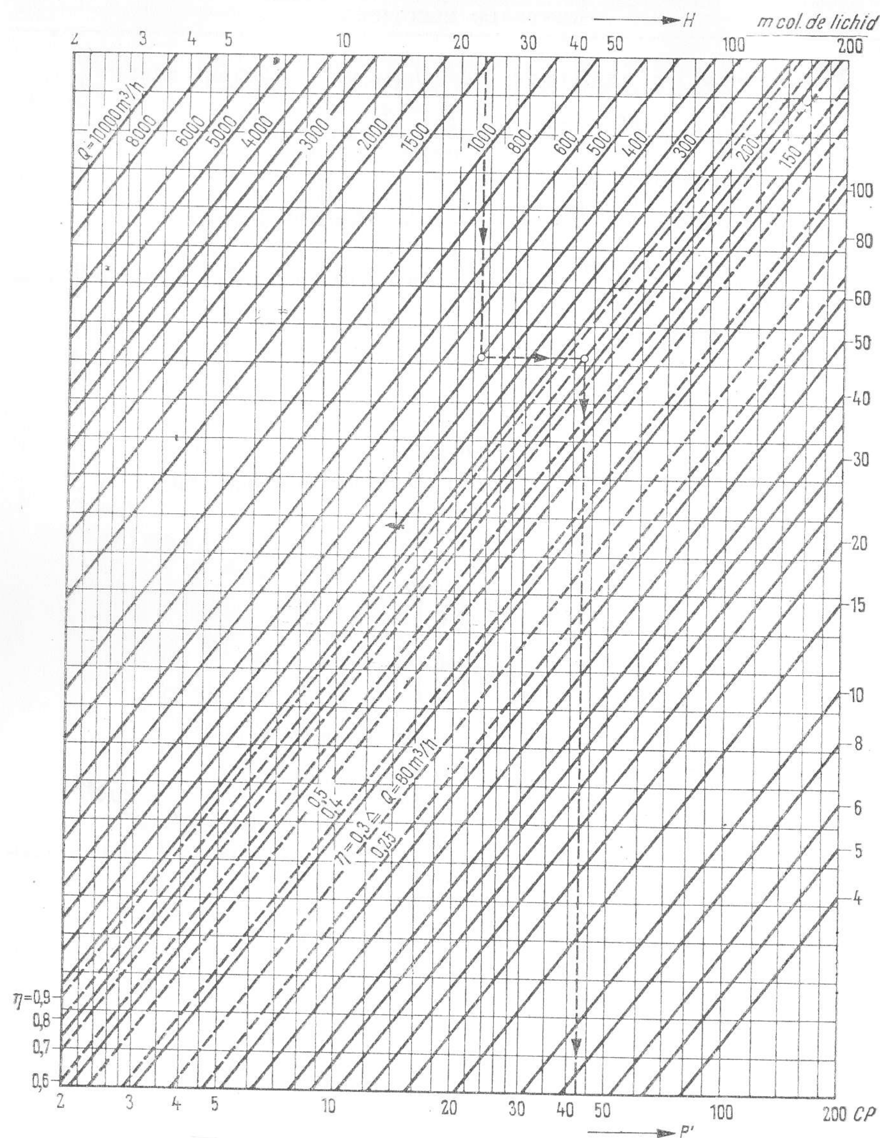


Fig. 5.31. Determinarea puterii absorbite de pompe la pomparea apei reci:
Exemplu:
H — 23 m coloană lichid;
Q — 400 m³/h;
η — 0,8;
p' — 42,5 CP (P — 0,735 P' kW).

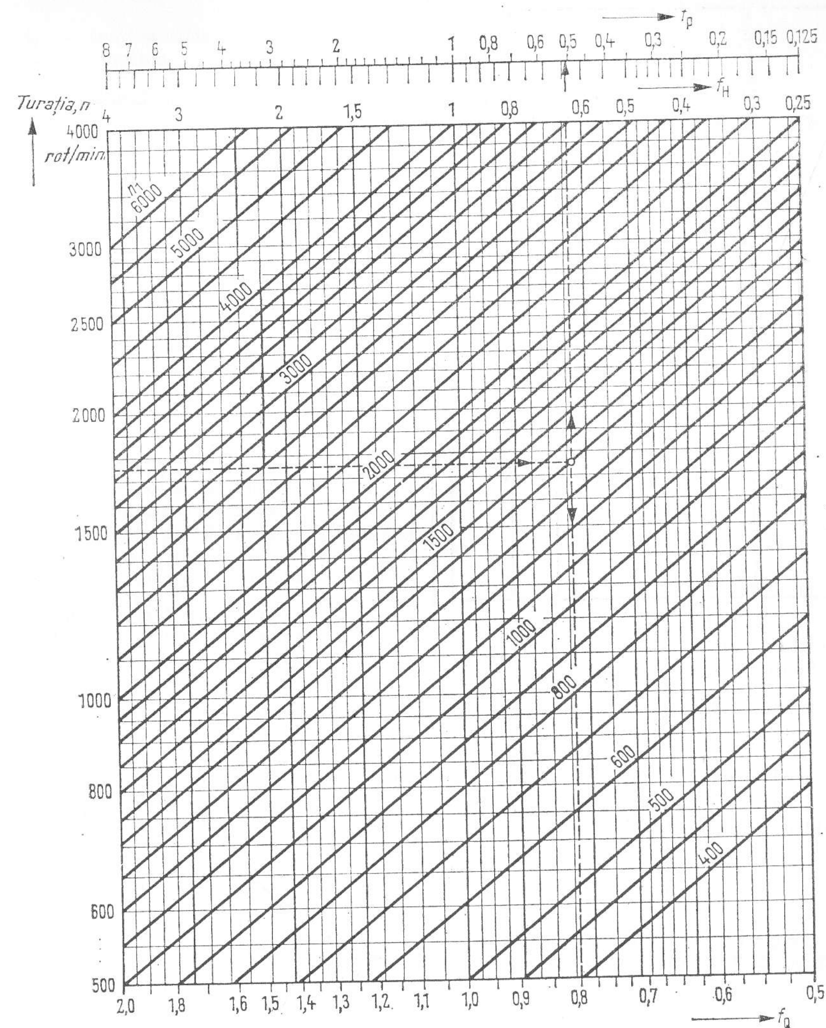


Fig. 5.32. Determinarea puterii pompelor centrifuge a diferite turații. Datele inițiale sînt Q, H și P la turațiile inițiale $n = 1750$ rot/min schimbată la $n_1 = 1\,400$ rot/min la care corespund factorii $f_Q = 0{,}8$, $f_H = 0{,}64$, $f_p = 0{,}51$,de unde $Q_1 = 0{,}8\ Q$, $H_1 = 0{,}64\ H$, $P_1 = 0{,}51\ P$.

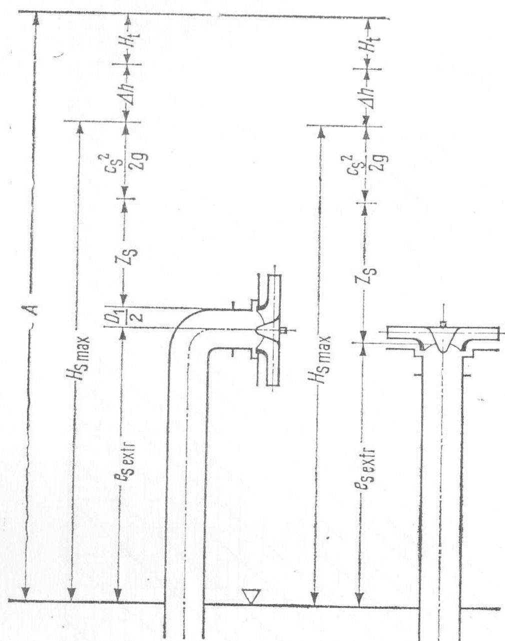


Fig. 5.33. Înălţimile de aspiraţie sau de poziţie pentru pompe rotative.

Schimbătoare de căldură

Bilanţul termic:

$$\Sigma Q_{intrat} = \Sigma Q_{ieşit}.$$

Schimbătorul de căldură de suprafaţă abur/lichid (fig. 5.34).

Cazul A: fără drenaje provenite de la aburul de încălzire ($E' = 0$):

$$E = \frac{G(i_2 - i_1)}{(i - i')\eta}.$$

Cazul B: cu drenaje provenite de la aburul de încălzire ($E' \neq 0$):

$$E = \frac{G(i_2 - i_1) - E'(i_{E'} - i')}{(i - i')\eta}.$$

Mediul absorbant de căldură:
- G — debitul, în kg/h;
- t_1 — temperatura de intrare, în °C;
- i_1 — entalpia de intrare, în kcal/kg;

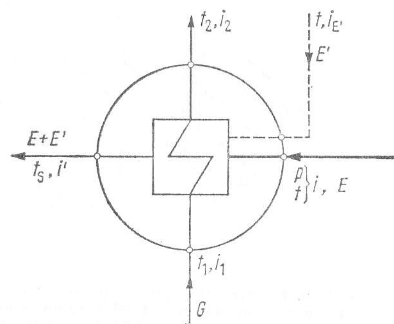


Fig. 5.34. Schimbător de căldură de suprafaţă (abur/lichid); schema bilanţului termic.

- t_2 — temperatura de ieşire, în °C;
- i_2 — entalpia de ieşire, în kcal/kg;

Schimbătorul de căldură prin amestec sau de tipul deschis (fig. 5.35)

În acest caz $i_2 = i'$. Calculele pentru cazul A şi cazul B sînt ca pentru schimbătorul de căldură de suprafaţă de mai sus.

Schimbătorul de căldură de suprafaţă lichid/lichid (fig. 5.36)

$$\Delta i = i_2 - i_1 = \frac{E(i_{tse} - i_{tsa})}{G}.$$

Mediul care cedează căldura:
- E — debitul, în kg/h;
- E' — debitul drenajelor aburului de încălzire, în kg/h (de exemplu din schimbătorul de căldură superior);
- F — suprafaţa de încălzire, în m²;
- i — entalpia mediului cald, în kcal/kg;
- $i_{E'}$ — entalpia drenajelor, în kcal/kg;
- i_{tsa} — entalpia de ieşire, kcal/kg;
- i_{tse} — entalpia de intrare, în kcal/kg;
- i' — entalpia de ieşire, în kcal/kg;
- k — coeficientul de schimb de căldură, în kcal/m²·h·grd.
- p — presiunea de intrare, în at;
- Q — debitul de căldură transferat, în kcal/h;
- t — temperatura, în °C;
- t_s — temperatura de saturaţie a condensatului aburului de încălzire, în °C;
- t_{sa} — temperatura condensatului la ieşirea din răcitor, în °C;
- t_{se} — temperatura condensatului la intrarea în răcitor, în °C;
- Δi — diferenţa de entalpie dintre intrare şi ieşire pe partea apei de alimentare, în kcal/kg;

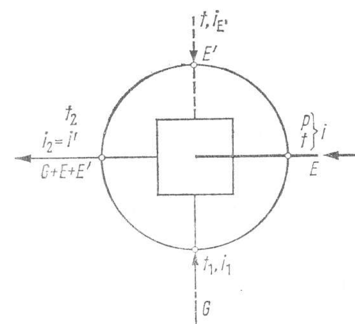


Fig. 5.35. Schema bilanţului termic la un preîncălzitor prin amestec.

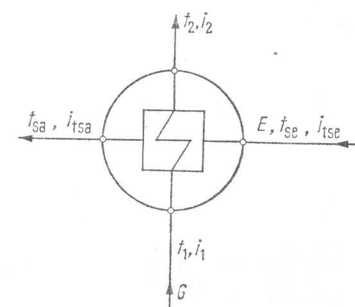


Fig. 5.36. Schimbător de căldură de suprafaţă (lichid/lichid); schema bilanţului termic.

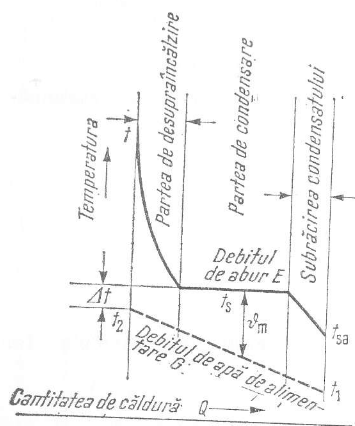


Fig. 5.37. Curbele de temperatură într-un schimbător de căldură de suprafaţă.

Δt — diferenţa de temperatură finală, în grd;

η — factorul care ia în consideraţie pierderile de căldură prin radiaţie (în cazul schimbătoarelor de căldură 0,99; pentru evacuare, evaporatoare şi transformatoare, în mod uzual 0,98);

θ_m — diferenţa de temperatură medie logaritmică, în grd.

Curbele de temperatură pentru un schimbător de căldură de suprafaţă cu desupraîncălzitor şi răcitor de drenaj (fig. 5.37). Temperatura mediului de încălzire scade de la temperatura t a aburului pînă la temperatura t_s corespunzătoare presiunii aburului şi mai departe pînă la temperatura t_{sa} a drenajului răcit, în timp ce apa de alimentare se încălzeşte de la t_1 pînă la temperatura de ieşire t_2. θ_m este folosită pentru a reprezenta diferenţa medie de temperatură, iar Δt diferenţa de temperatură finală a preîncălzitorului de apă de alimentare. Diferenţele mici de temperatură finală necesită suprafeţe de schimb de căldură mai mari, îmbunătăţind însă randamentul instalaţiei. Diferenţele mici de temperatură finală sînt însă adecvate numai pentru instalaţiile proiectate pentru eficienţă economică maximă (tab. 5.11).

Tabelul 5.11. **Diferenţele de temperatură finale normale şi tipuri de schimbătoare de căldură de suprafaţă**

	Presiunea aburului	Diferenţa de temperatură finală normală	Proiectare uzuală
Partea de vid Partea de joasă presiune Partea de medie presiune	0,1 — 1 at 1 — 5 at 5 — 10 at înaintea pompei de alimentare	Aproximativ 3 — 5 grd	Dacă este posibil, toate de tip similar, în cele mai frecvente cazuri verticale sau orizontale
Partea de înaltă presiune	5 — 80 at după pompa de alimentare	1 — 6 grd inclusiv desupraîncălzitorul	Tip vertical, variante speciale

Tabelul 5.12. **Coeficienţi de schimb de căldură pentru diferite schimbătoare**

Denumirea	Coeficientul de schimb de căldură k (aproximativ), kcal/m² · h · grd
Desupraîncălzitor şi supraîncălzitor (abur/abur)	100— 200
Desupraîncălzitor (integrat sau separat) pentru răcirea aburului cu apă de alimentare	180— 700
Schimbător de căldură (abur/lichid):	
preîncălzitor de înaltă presiune	2500—3600
preîncălzitor de joasă presiune	1500—2500
preîncălzitor de vid	900—1500

Tabelul 5.12 (continuare)

Denumirea	Coeficientul de schimb de căldură k (aproximativ) kcal/m²·h·grd
Schimbător de căldură (lichid/lichid) răcitor de condensat de înaltă presiune:	
integrat	600—1500 conform proiectului
separat	1400—2100
Răcitor de condensat de joasă presiune:	
integrat	400— 700
separat	600—1400

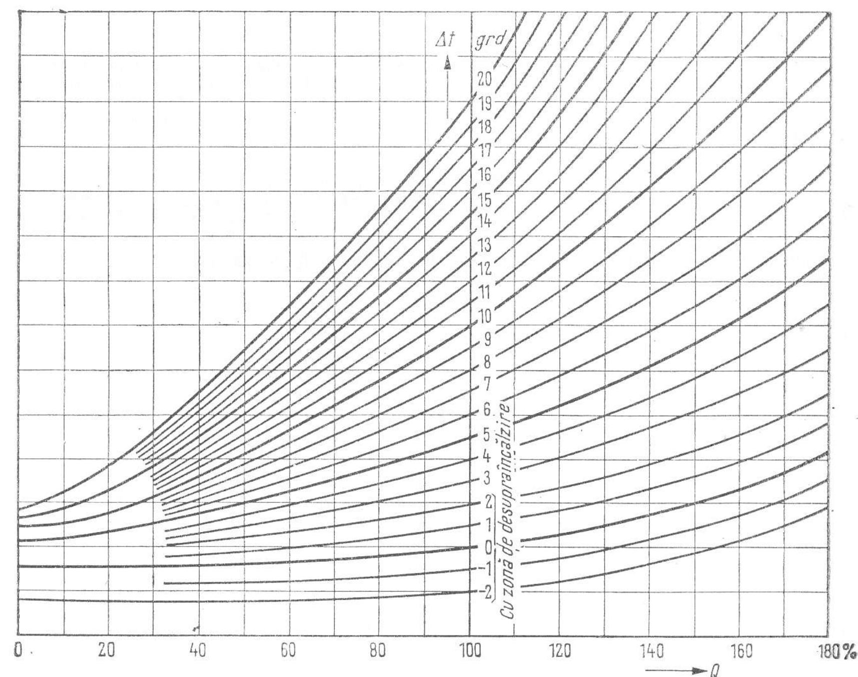


Fig. 5.38. Variaţia diferenţei finale de temperatură în schimbătoarele de căldură în funcţie de variaţia sarcinii.

Suprafaţa de încălzire se calculează cu relaţia:

$$F = \frac{Q}{k\theta_m} \text{ [m}^2\text{]}$$

în care: Q este căldura transmisă, în kcal/h;
θ_m — diferenţa de temperatură medie logaritmică, în grd;
k — coeficientul de schimb de căldură, în kcal/m²·h·grd;
G — debitul apei de alimentare, în t/h.

Conducte

Pierderea de presiune în conductele de abur se determină din:

$$\Delta p = \frac{\lambda l \gamma c^2}{10 d 2g} \text{ sau } \Delta p = \frac{638 \lambda l G^2}{\gamma d^5};$$

$$Re = \frac{cd\gamma}{1000 \eta g} \text{ sau } Re = \frac{0{,}036 G}{d \eta}.$$

Lungimea conductei echivalente rezistenţelor hidraulice individuale se calculează cu relaţia:

$$l = \frac{\zeta d}{1000 \lambda}.$$

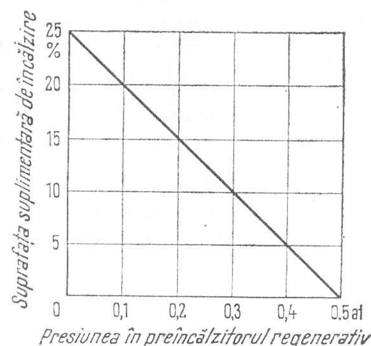


Fig. 5.39. Suprafaţa suplimentară de încălzire cu preîncălzitoare regenerative cu vid, ţinînd seama de conţinutul de aer din abur.

Pierderile de înălţime în conductele de apă se calculează cu:

$$\Delta h = \frac{1000 \lambda l c^2}{d\ 2g}.$$

În aceste relaţii s-au folosit notaţiile;

c — viteza de curgere, în m/s;
d — diametrul conductei, în mm;
G — debitul de abur, în kg/h;
g — acceleraţia gravităţii, 9,81 m/s²;
k — rugozitatea conductei, în mm;
k/d — rugozitatea relativă;
l — lungimea conductei, în m;
Re — numărul lui Reynolds;
t_k — temperatura punctului critic, în °C;
Δh — pierderea de înălţime în conductele de apă, în m H_2O;
$\varkappa$ — conţinutul de vapori (100% = 1,0);
γ — greutatea specifică a aburului, în kgf/m³;
Δp — pierderea de presiune în conducte de abur, în at;
ζ — coeficientul de pierderi al rezistenţelor locale;
η — viscozitatea dinamică, în kgf·s/m²;
η_k — viscozitatea dinamică în punctul critic;
λ — coeficientul de pierderi prin frecare al conductei.

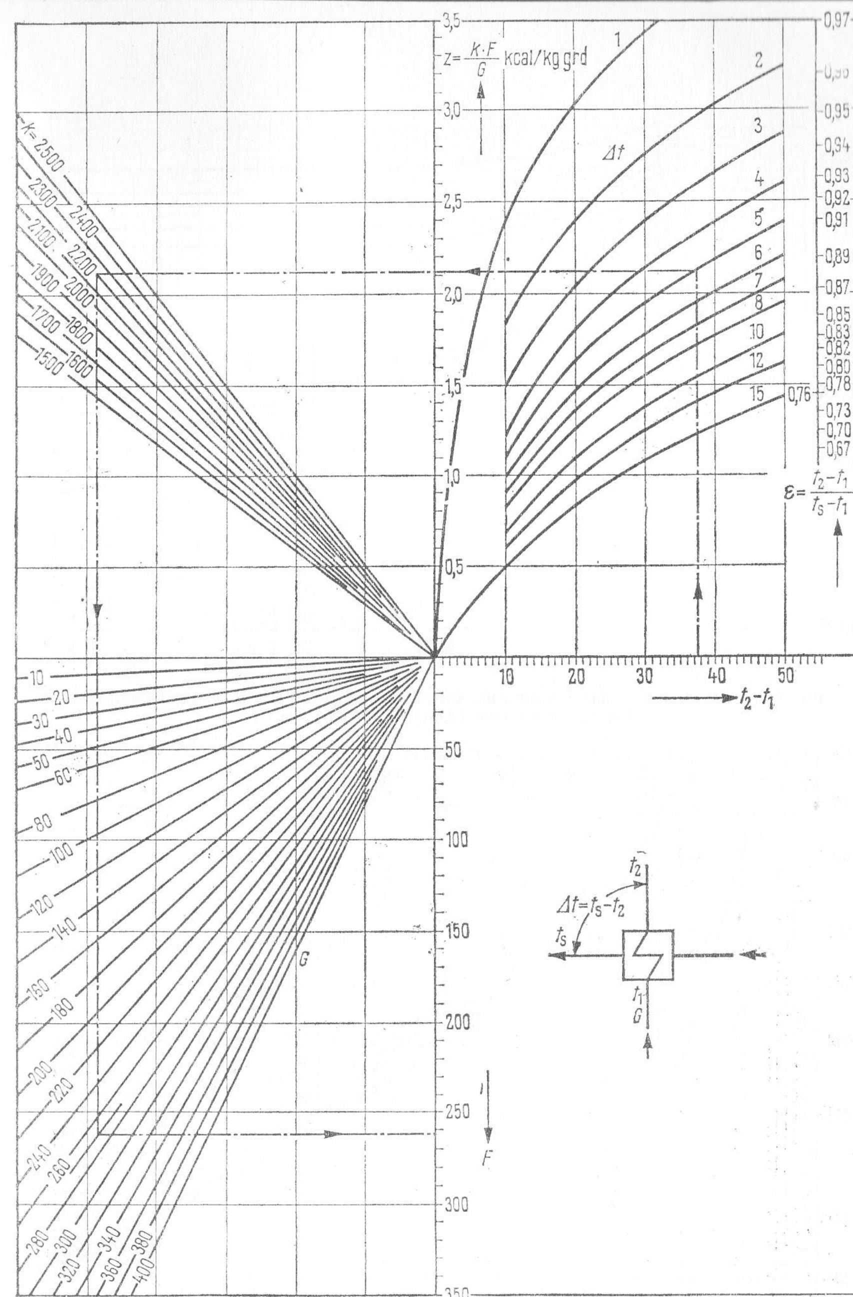


Fig. 5.40. Determinarea aproximativă a suprafeţelor de schimb de căldură la schimbătoarele de căldură de suprafaţă:

Exemplu:
Creşterea de temperatură $t_2 - t_1 = 37{,}5$ grd;
Diferenţa de temperatură finală $\Delta t = 5$ grd;
Coeficientul de schimb de căldură $k = 2\,200$ kcal/m²·h·grd;
Debitul apei de alimentare $G = 270$ t/h;
Suprafaţa de încălzire $F = 262$ m²;
Criteriu al suprafeţei specifice de încălzire necesare $Z = kF/G$ kcal/kg·grd;
Factorul de utilizare $\varepsilon = (t_2 - t_1)\ (t_s - t_1)$.

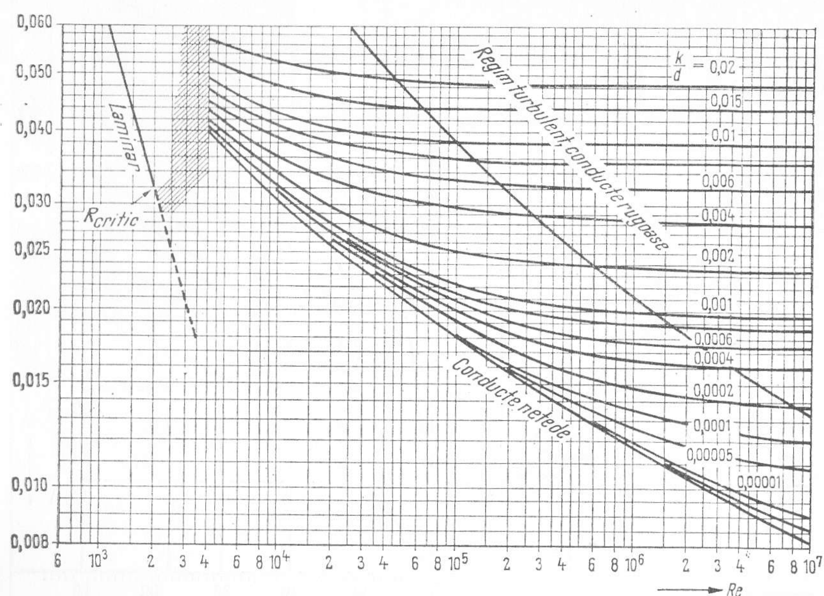


Fig. 5.41. Viscozitatea dinamică a aburului saturat uscat (η'') și aburului supraîncălzit (η) în funcție de presiune (p) și de temperatură (t).

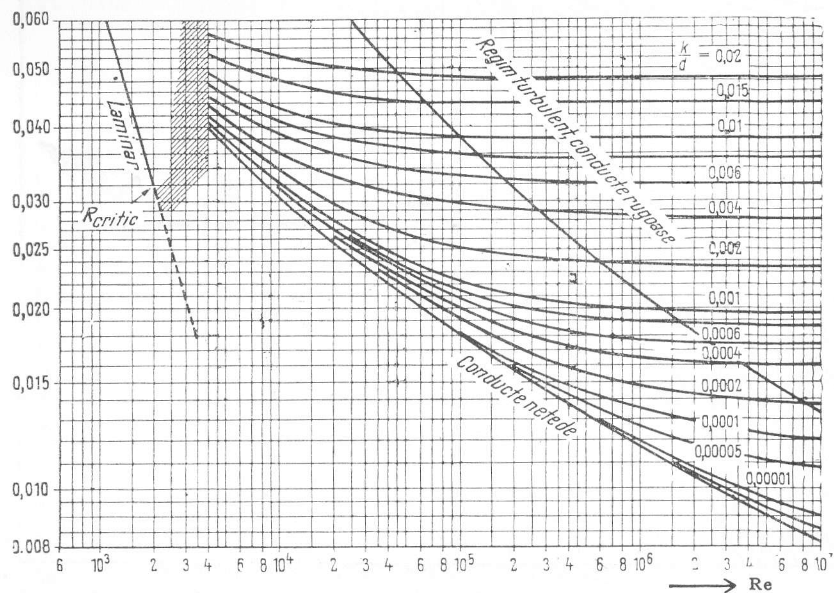


Fig. 5.42. Coeficientul de frecare în conducte λ în funcție de numărul Reynolds Re și de rugozitatea relativă k/d.

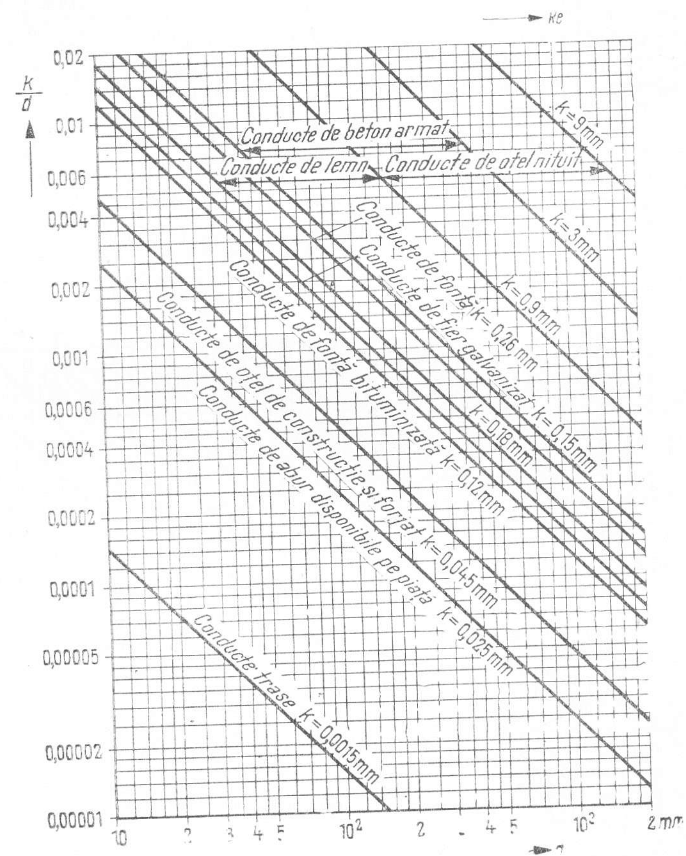


Fig. 5.43. Rugozitatea relativă a conductei k/d în funcție de diametrul conductei d.

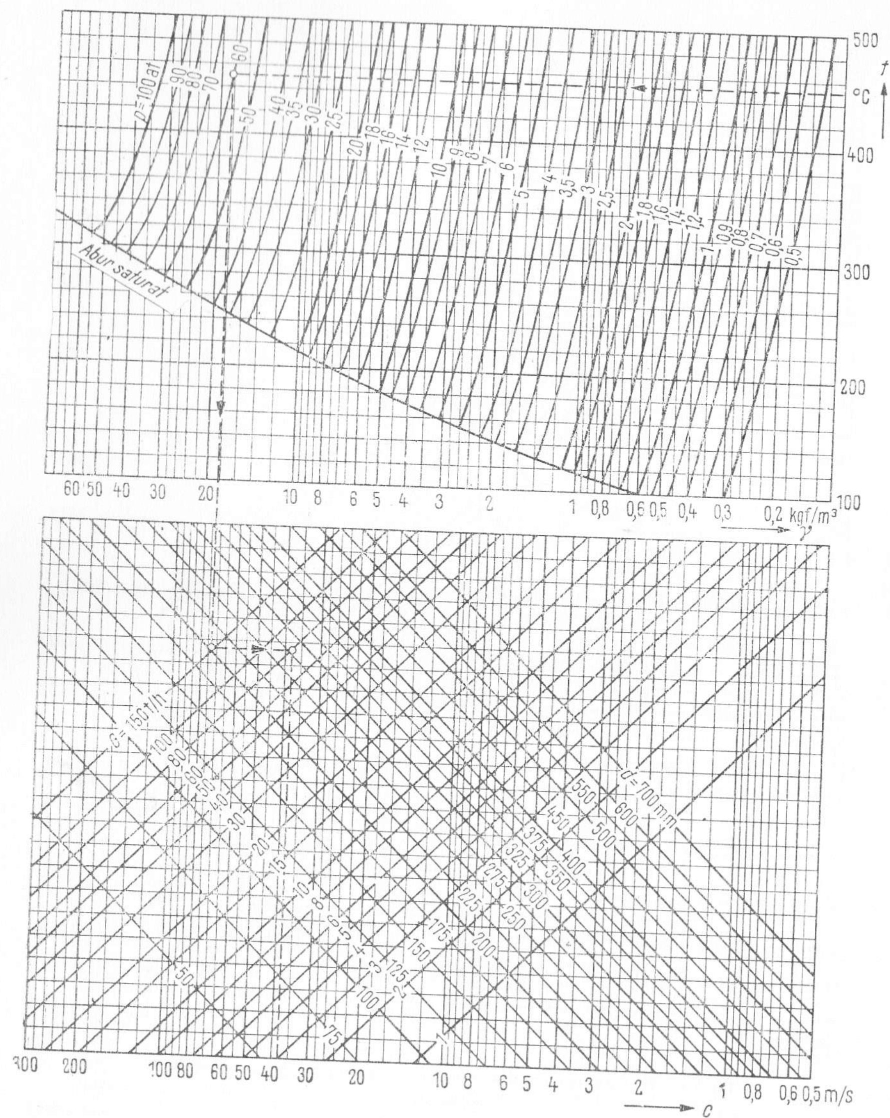


Fig. 5.44. Viteza în conductele de abur.

Exemplu:

Presiunea aburului	p = 60 at;
Temperatura aburului	t = 450°C;
Diametrul conductei	d = 200 mm;
Debitul de abur	G = 80 t/h;
Viteza	c = 38 m/s.

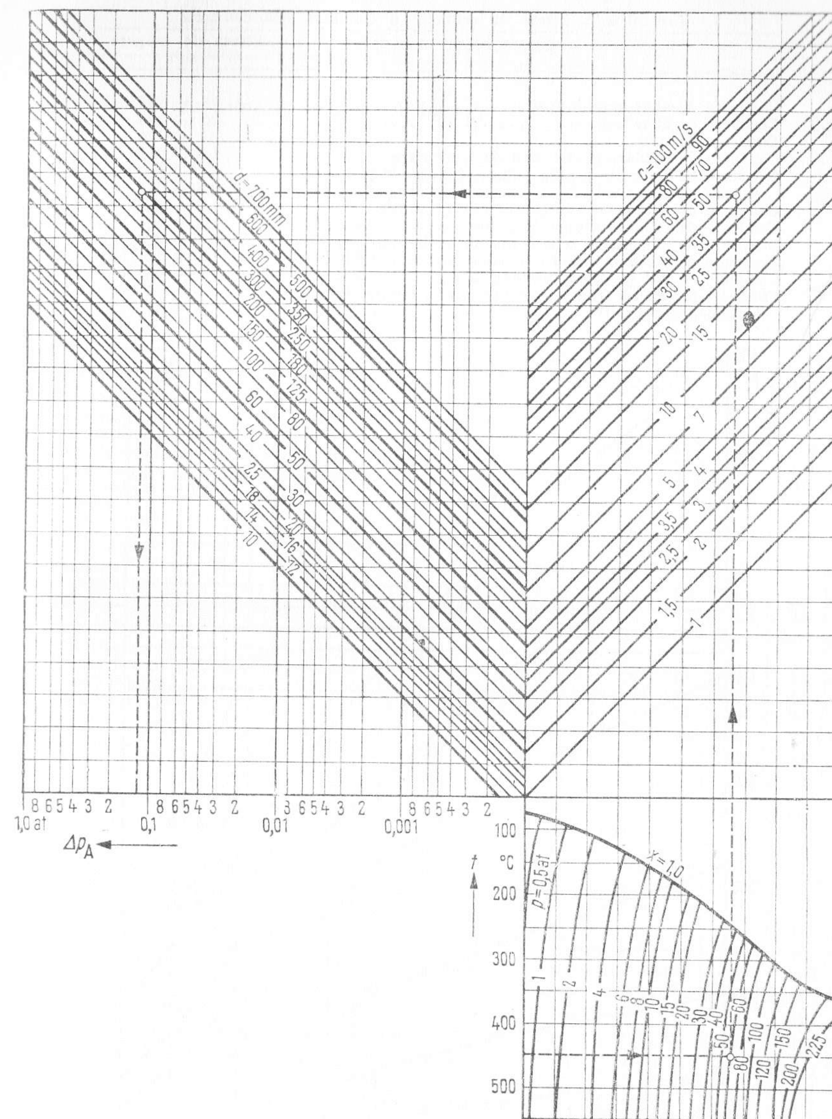


Fig. 5.45. Căderea de presiune în conducte de abur cu lungimea de 10 m.

Exemplu:

Temperatura aburului	t = 450°C;
Presiunea aburului:	p = 60 at;
Viteza	c = 38 m/s;
Diametrul conductei	d = 200 mm;
Pierderea de presiune	Δp_A = 0,13 at.

Tabelul 5.13. **Viteze de scurgere a fluidului prin conducte**

	Viteza de curgere c m/s
Conducte de abur supraîncălzit	25 — 45
Conducte de abur saturat	20 — 30
Conducte de vid	45 — 70
Conducte de refulare pentru apa de alimentare	1,5 — 4,0
Conducte de aspirație pentru pompe (funcție de presiunea și temperatura apei)	0,5 — 1,5
Conducte de condensat sub presiune	1,5 — 2,5
Conducte de refulare a apei de răcire	1,5 — 2,5
Conducte de alimentare pentru apa de răcire	0,5 — 1,5
Conducte de aer comprimat	10 — 15
Conducte de gaz de joasă presiune	15 — 20
Conducte de păcură (funcție de viscozitate, temperatură și lungimea conductei)	0,8 — 2

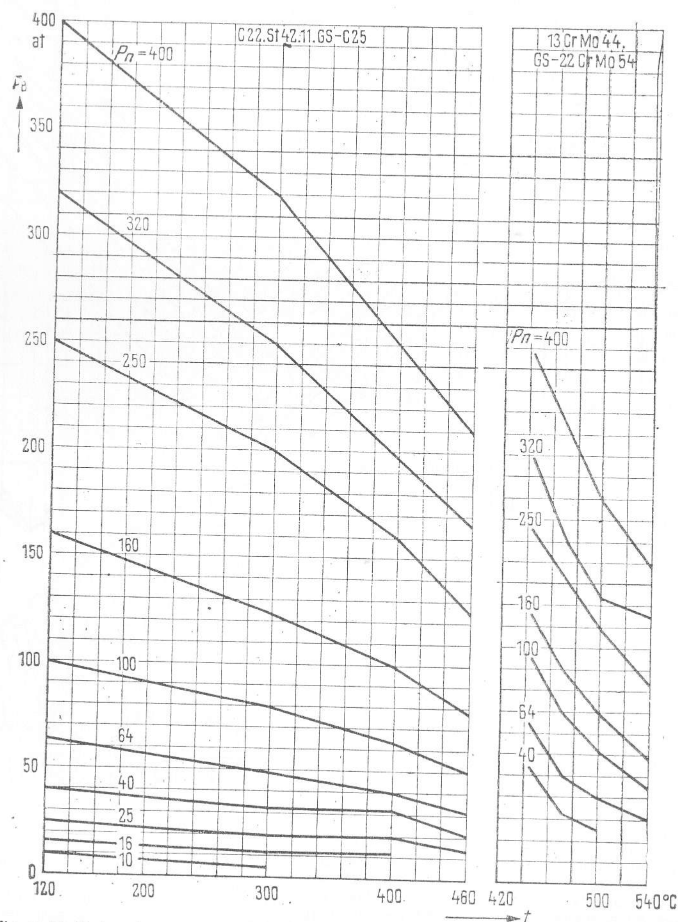


Fig. 5.46. Determinarea presiunii nominale (P_n) a armăturilor la temperaturi pînă la 540°C și diverse presiuni pînă la 400°C.
Exemplu: Presiunea maximă de lucru p_B = 70 at, temperatura t = 300°C. P_n = 100 pentru oțel C_{22}, $St_{42\cdot 11}$ sau oțel turnat GS — C_{25}

Pierderi de presiune în vane și fitinguri:

$$H_v = \zeta \frac{c^2}{2g} \text{ [m coloană lichid]}.$$

Tabelul 5.14. **Valorile coeficientului de rezistență pentru ventile și vane armate**

Armături

Diametrul nominal, mm	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200
Ventile cu două căi:										
cu rezistență foarte redusă	1,7	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6
cu rezistență redusă	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	2,4	2,3	2,1	2,0
standard german	4,0	4,2	4,4	4,5	4,7	4,8	4,8	4,5	4,1	3,6
armate, cu scurgere liberă				1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3	1,6
armate, forjate	6,5	6,5	6,5	6,5						
armate, oțel turnat					3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	4,0
Ventile înclinate:										
cu rezistență scăzută	1,6	1,6	1,7	1,9	2,0	2,0	1,9	1,7	1,5	1,3
standard german	2,8	3,0	3,3	3,5	3,7	3,9	3,8	3,3	2,7	2,0
Ventile de reținere:										
cu rezistență foarte scăzută				2,0	2,0	2,0	1,6	1,6	2,0	2,5
cu rezistență scăzută	2,7	2,8	3,0	3,3	3,6	3,9	4,1	3,9	3,3	2,6
standard german	4,5	4,8	5,3	6,0	6,6	7,4	7,6	7,2	6,0	4,5
Clapete de reținere[1])	1,9	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8

Ventile plane fără limitare	0,25 — 0,15
Filtru cu supapă de aspirație	2,5 — 2,2
Filtru cu orificiu	1,1 — 1,9

Vană cu sertar, armată, de înaltă presiune [2])

Diametrul interior nominal, mm	80	100	125	150	175	200	250	300	350	400
Diametrul interior [3]), mm	65	80	100	125	150	150	200	250	300	300
Coeficientul de limitare 1 la	0,66	0,64	0,64	0,69	0,74	0,56	0,64	0,69	0,74	0,56
ξ	0,4	0,42	0,42	0,36	0,3	0,6	0,42	0,36	0,3	0,6

[1]) *Hv* cel puțin 0,2 m coloană lichid fără braț și greutate, sau 0,5 m coloană lichid cu braț și greutate;
[2]) După porțiunea lineară a conductei, minimum 12 diametre nominale măsurate după vană cu sertar;
[3]) Trecerea directă.

Caracteristicile materialelor

Tabelul. 5.15. Gamă de temperaturi a oţelurilor rezistente la temperatură

Materialul [1]	Temperatura admisibilă de regim (limita superioară) °C	Utilizat în practică pînă la °C
St 35,8	520	450
15 Mo 3	530	510
13 Cr Mo 44	560	530
10 Cr Mo 910	590	530
14 Mo V 63	560	550
X 20 Cr Mo V 121	600	580
X 8 Cr Ni Mo V Mb 1613	650	640
X 8 Cr Ni Nb 1613.......	850	700
X 8 Cr Ni Mo Nb 1616	800	700
X 10 Cr Ni Nb 189	—	550

1) Standard german

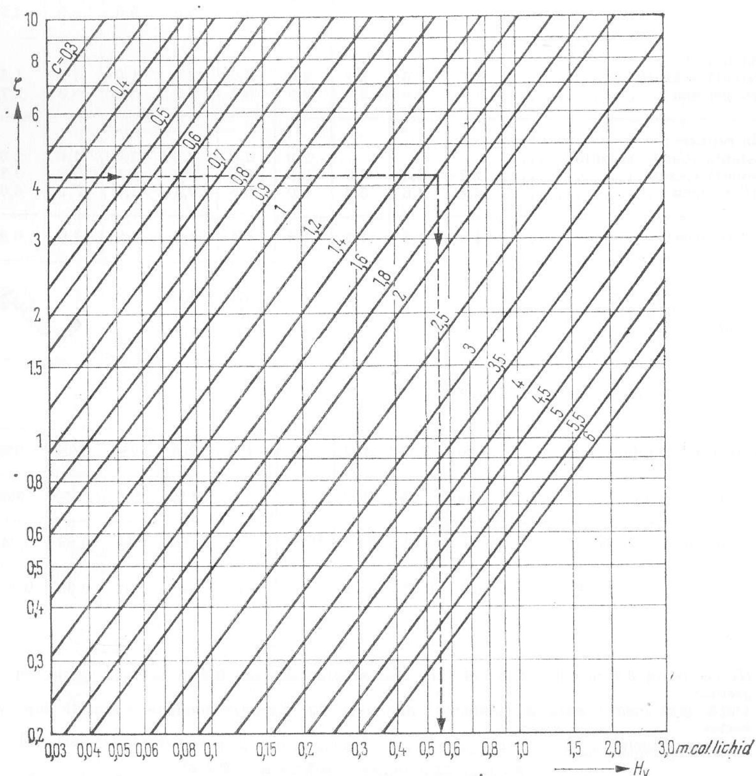


Fig. 5.47. Determinarea pierderilor de înălţime H_v în ventile şi armături.
Exemplu: Pentru o armătură cu un coeficient de rezistenţă $\xi = 42$ şi $c = 1{,}6$ m/s pierderea de presiune este H_v 0,55 m coloană de lichid.

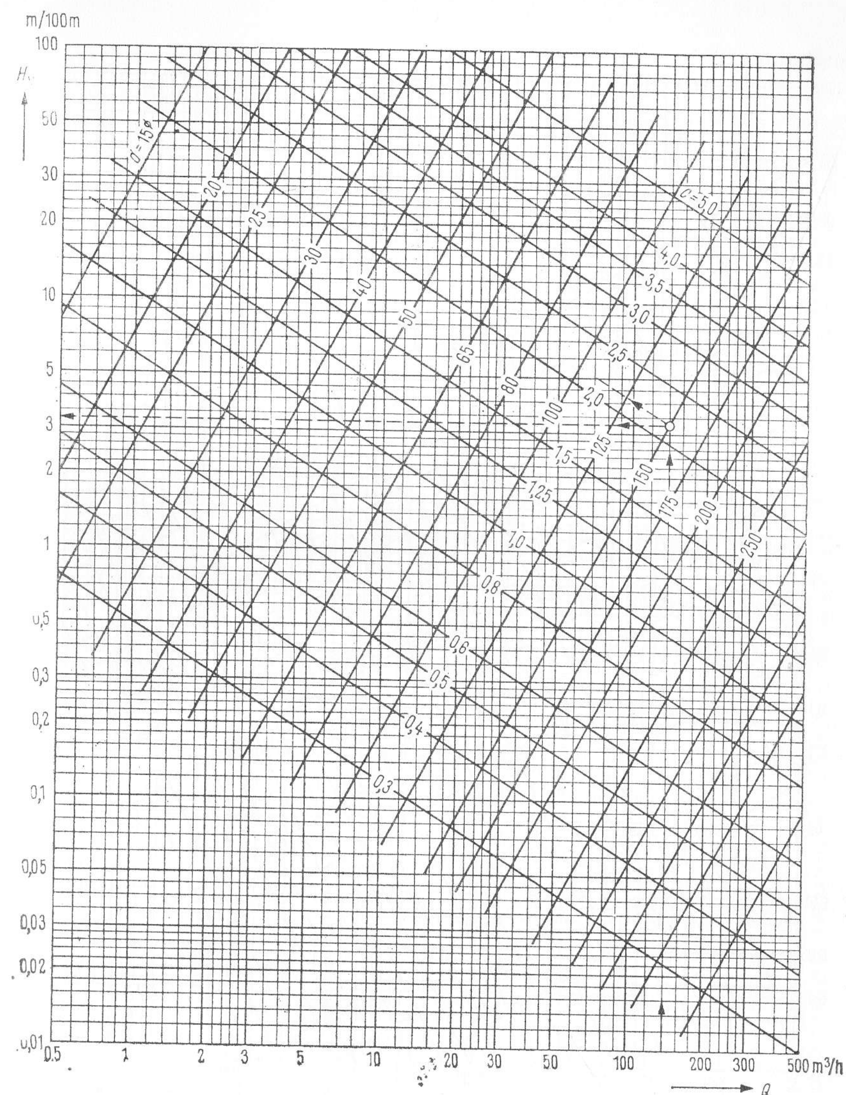


Fig. 5.48. Pierderile de înălţime în conductele drepte cu diametrul interior de 15—250 mm şi debitul Q de 0,5—500 m³/h, pentru apă la 18°C.
Exemplu: Debitul de apă la 18°C: $Q = 140$ m³/h; conductă turnată d (interior) = 150 mm; Rezultă: pierderea de înălţime H_v = 3,25 mm coloană de lichid/100 m; viteza $c = 2{,}2$ m/s.

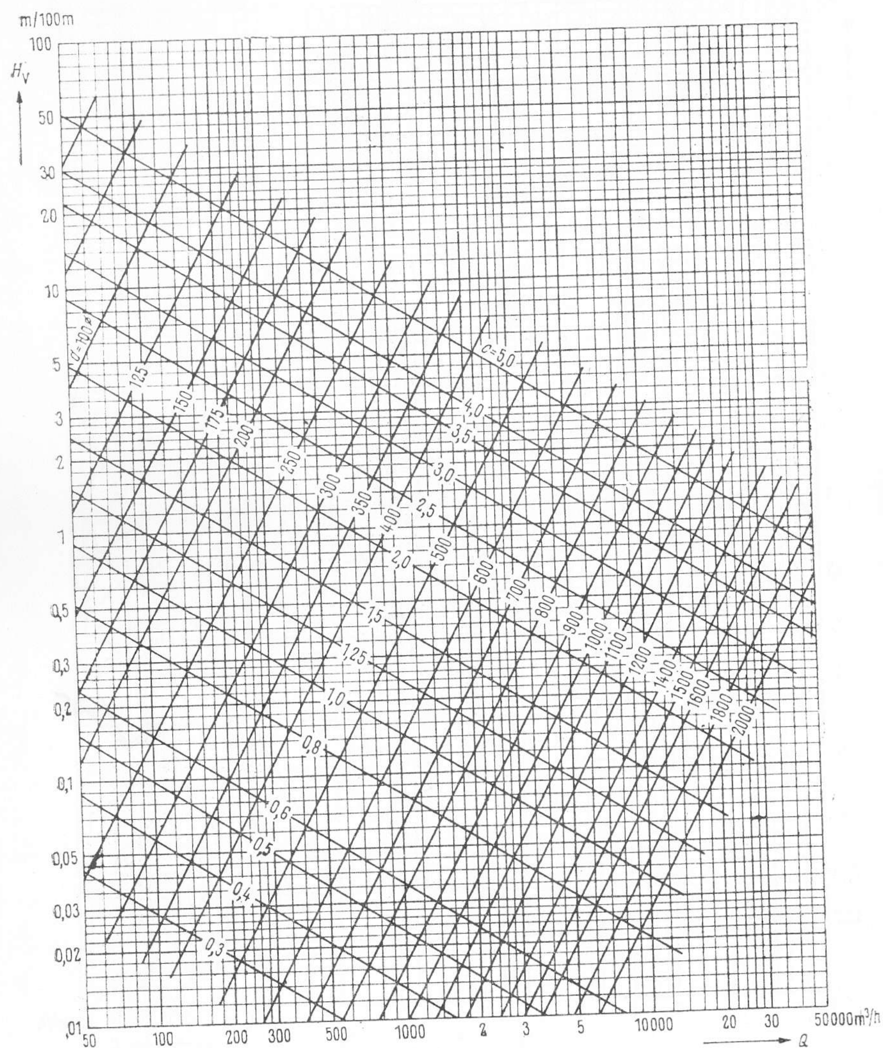


Fig. 5.49. Pierderile de presiune în conductele drepte cu diametrul interior de 100 — 2 000 mm şi debite Q de 50 — 50 000 m³/h, pentru apă la 18°C.

Pierderile de presiune trebuie înmulţite cu: 0,8 pentru conducte noi, laminate din oţel; 1,25 pentru conducte de fier mai vechi, ruginite; 1,7 pentru conducte cu cruste, depunerile reducînd diametrul interior.

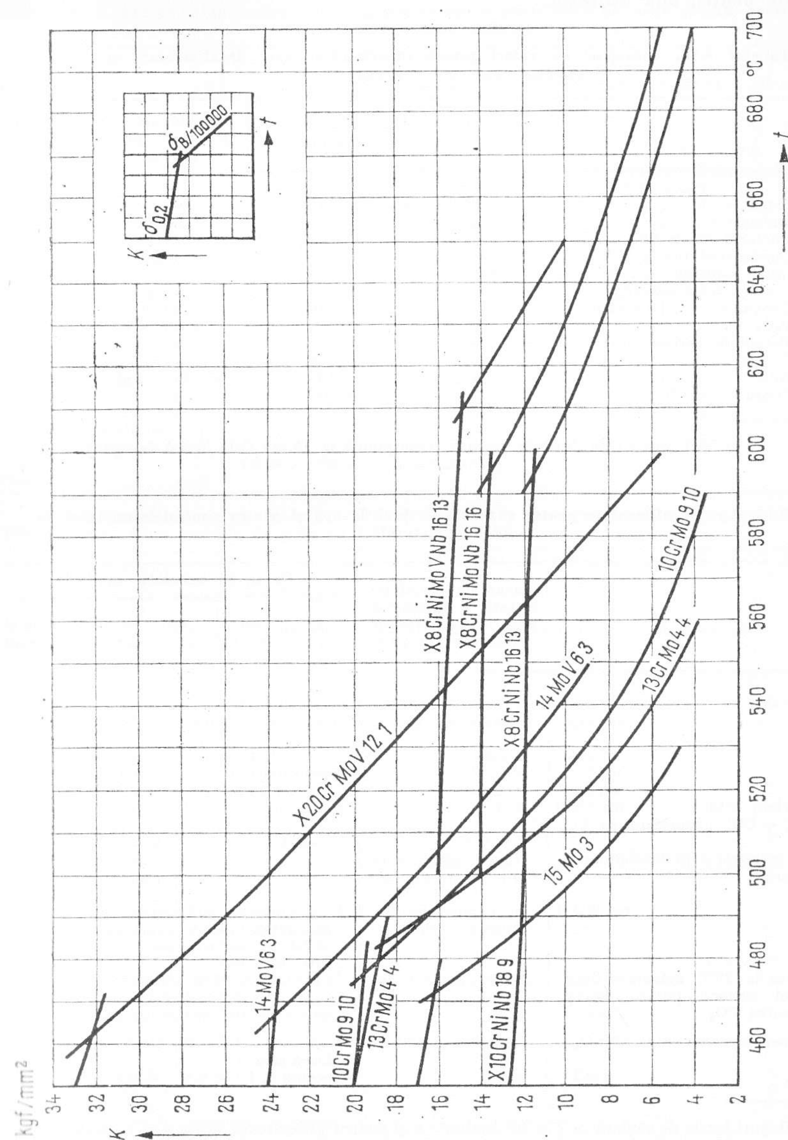


Fig. 5.50. Caracteristicile mecanice ale oţelurilor rezistente la temperatură:

K — coeficient caracteristic al materialului, în kgf/mm²; t — temperatura, în °C; $\sigma_{0,2}$ — rezistenţa de curgere (efortul cu 0,2% alungire permanentă); $\sigma_{B/10^5}$ — rezistenţa la fluaj (sarcina constantă pe epruvetă, care se rupe după durata probei de 100 000 h).

Cerinţe pentru apa utilizată

Tabelul 5.16. **Îndreptar de valori pentru vaporizatorul apei de alimentare şi reziduuri provenite din evaporare**

		Apa de alimentare	Reziduuri provenite din evaporare
Duritate	°dH [1]	< 0,05	—
Indicele p	mval/l	—	< 6
Factorul pH la 20°C		7—9,5	8,5—11
Conductivitatea la 20°C (după neutralizarea cu HCl în prezenţa fenolftaleinei)	µS/cm	—	< 5 000 (D < 0,25 Bé)
Conţinutul total de săruri	mg/l	< 1 000	< 3 000
P_2O_5	mg/l	1—5	< 25
Bioxid de carbon legat	mg/l	< 20	—
Oxigen	mg/l	< 0,02	—
SiO_2	mg/l	< 10	< (30 + 3 p)
Consum de $KMnO_4$	mg/l	< 10	—

[1]) °dH (gradul de duritate german) corespunde la 10 mg CaO în 1 l de apă.

Tabelul 5.17. **Apa de alimentare pentru cazanele cu ţevi de apă şi pentru centralele nucleare cu circulaţie naturală**

	Cazan cu circulaţie forţată şi injecţie de apă la răcitorul de abur supraîncălzit	Cazan cu circulaţie multiplă: 20 at [1])	40 at [1])	44 at [1])	80 at şi peste şi centrală nucleară
Condiţii generale:	limpede şi fără culoare				
Oxigen mg O_2/l	Maximum, 03 (în timpul pornirii şi opririi); în exploatare de regim < 0,02				
Duritate mval/l	Lipsă	0,02	0,01	0,01	Lipsă
Fier total mg Fe/l	< 0,02	preferabil 0,05			< 0,03
Cupru mg Cu/l	< 0,005	< 0,01			< 0,005
Bioxid de carbon total mg CO_2/l ($CO_2 + HCO_3^- + CO_3^{--}$) considerat ca CO_2	< 1	preferabil < 20mg/l			< 1
pH la 20°C	7 — 9,5	7 — 9,5			7 — 9,5
de reţinut pompele şi preîncălzitoarele de alimentare	Numai agenţi volatili de alcalinizare				Dacă este posibil numai agenţi volatili de alcalinizare
Acid silicic mg SiO_2/l	În exploatare de regim < 0,02	În exploatare fără sistemul de curăţire, maximum 0,02 în exploatare de regim; altfel în conformitate cu datele pentru apa de cazan.			
Conductivitatea la 20°C măsurată după schimbătorul cationic puternic acid şi după eliminarea CO_2 µS/cm	În exploatare de regim < 0,2	În exploatare fără sistemul de curăţire, maximum 0,3; altfel în conformitate cu datele pentru apa de cazan			
Conţinut de permanganat mg $KMnO_4$/l	Dacă este posibil < 5	Dacă este posibil < 10			Dacă este posibil < 5
Ulei mg/l	< 0,3	Dacă este posibil < 1		< 0,5	< 0,5

[1]) Cu fluxuri locale de căldură > 2 < 10^5 kcal/m² · h şi pentru generatoare de abur în centrale nucleare **trebuie** utilizate pentru presiunile cazanelor valorile peste 80 at.

Tabelul 5.18. **Apa de cazan pentru cazane cu ţevi de apă şi generatoare de abur pentru centrale nucleare cu circulaţie naturală**

	20 at	40 at	64 at	80 at	125 at	160 at	Centrale nucleare
				Dacă este posibil, nu trebuie adăugaţi bidroxizii-alcalini			
Indicele p mval/l	< 10	< 6	< 3	< 1	< 0,3	< 0,1	< 1
Acid silicic mg SiO_2/l calculat cu valoarea lui p şi cu formula cînd conţinutul de SiO_2 din abur < 0,02mg/kg	< (70 + 7p)	< (30 + 3p)	< 10	< 4	< 1,2	< 0,4	< 4
Fosfat ...... mgP_2O_5/l dacă duritatea nu apare în mod cert (de exemplu la demineralizarea condensatului, poate fi complet exclus)	< 25	< 10	< 10	< 3	< 3	< 3	< 3
Conductivitatea la 20°C .... µS/cm după neutralizarea cu HCl în prezenţa fenolftaleinei	< 8 000 (D = 0,4 °Bé)	< 5 000 (D = 0,25 °Bé)	< 2 500	< 1 500	< 250	< 50	< 500
Clor ....mg/l							< 75 [1]

Dacă fluxurile locale de căldură > 2 × 10^5 kcal/m² · h, este recomandată utilizarea valorilor pentru 160 at pentru toate treptele de presiune (cu excepţia SiO_2).

[1]) Aplicabilă pentru ţevi Inconel.

Tabelul 5.19. **Agentul de răcire pentru reactorul cu apă sub presiune**

	Reactoare de putere cu H_2O cu control cu acid boric, H_2O	Reactoare cu apă grea D_2O
Parametrii apei:		
Conductivitatea în µS/cm } la 25 °C şi 1 at	< 40	< 30
Factorul pH sau pD } la 25 °C şi 1 at	5—10 (conform acidului boric adăugat)	9—10,5
Concentraţia D_2O în mol %	—	> 99,5
Adaosuri:		
Agent de control al pH, molar (bază puternică sau amoniac)	1 × 10^{-4} — 3 × 10^{-4}	—
Agent de control al pD, molar (LiOD sau deuteroamoniac)	—	1 × 10^{-4} — 3 × 10^{-4}
Hidrogen sau deuteriu, în mg/kg	2 — 3	4 — 6
Acid boric, în mg/kg	0 — 25 000	—
Contaminare:		
Oxigen, în mg/kg	< 0,2	< 0,2
Clor, în mg/kg	< 0,2	< 0,1
Sodiu, în mg/kg	< 0,5	< 0,5
Substanţe grase în suspensie, în mg/kg........	< 1,0	< 1,0

În cazul contaminării, limitele superioare pentru unele substanţe dăunătoare sînt date numai informativ.

Tabelul 5.20. **Valorile titlului aburului pentru turbine cu abur**

	Valori admisibile	Valori recomandate
Conductivitatea la 20 °C, măsurată după filtrul cationic puternic acid şi eliminarea CO_2, ... μS/cm	< 0,3	< 0,1
Bioxid de siliciu ...... mg SiO_2/l	< 0,02	< 0,01
Fier total, ... mg Fe/l	< 0,02	< 0,005
Alte metale grele, ... mg/l	< 0,005	< 0,002
Sodiu şi potasiu, ... mg/l	< 0,01	< 0,01

Tabelul 5.21. **Parametrii apei de alimentare a cazanelor şi generatoarelor de abur în centrale nucleare cu circulaţie forţată**

	Valori admisibile	Valori recomandate
Condiţii generale	Limpede şi fără culoare	
Factorul *p*H la 20 °C	7–9,5	9–9,5
Conductivitatea la 20 °C măsurată după filtrul cationic puternic acid .... μS/cm	< 0,5	< 0,2
Conţinut de sare .... mg/l	< 0,1	< 0,02
Sodiu şi potasiu .... mg/l	< 0,05	< 0,01
Oxigen .... mg O_2/l	< 0,02	< 0,005
Bioxid de carbon total .... mg CO_2/l	< 1	< 0,1
Acid silicic .... mg SiO_2/l	< 0,02	< 0,01
Fier total.......................... mg Fe/l	< 0,02	< 0,01
Cupru .... mg Cu/l	< 0,005	< 0,002
Alţi oxizi de metale grele .... mg/l	< 0,005	< 0,001
Duritate .... mval/l	lipsă	
Ulei .... mg/l	< 0,3	< 0,1
Conţinutul de hipermanganat .... mg $KMnO_4$/l	< 5	< 2
Amoniac .... mg NH_3/l	0–2	0,03–1,0
Hidrazină . ... mg N_2H_4/l	0–1	0,05–0,1
Clor (se aplică numai la generatorul de abur pentru centrala nucleară) ...... mg/l	< 0,2	

Fig. 5.51. Solubilitatea acidului boric (H_3BO_3) în apă:
Greutatea moleculară:
Bor 10,82
H_3BO_3 61,84
1% bor
≙ 5,71% H_3BO_3
1% H_3BO_3
≙ 1750 p. p. m. bor
Exemplu: la o concentraţie de bor de 20 000 p. p. m. temperatura minimă ≥ 55°C.

Fig. 5.52. Solubilitatea oxigenului din aer în apa distilată:
t — temperatura apei; *O* — conţinutul de oxigen.

Caracteristicile materialelor

Tabelul 5.22. **Parametrii caracteristici al apei şi aburului la saturaţie**

Temperatura t °C	Presiunea p at	Volumul specific		Entropia		Entalpia		Căldură latentă de vaporizare r kcal/kg
		apă v' dm³/kg	abur v'' m³/kg	apă s' kcal/kg·grd	abur s'' kcal/kg·grd	apă i' kcal/kg	abur i'' kcal/kg	
0	0,006228	1,0002	206,3	0	2,1865	0	597,2	597,2
5	0,008894	1,0000	147,1	0,0182	2,1552	5,03	599,4	594,4
10	0,012517	1,0002	106,4	0,0361	2,1254	10,04	601,6	591,6
15	0,017381	1,0008	77,96	0,0536	2,0969	15,04	603,8	588,8
20	0,02383	1,0017	57,84	0,0708	2,0697	20,03	606,0	586,0
25	0,03229	1,0029	43,40	0,0876	2,0436	25,02	608,2	583,2
30	0,04325	1,0043	32,94	0,1042	2,0186	30,00	610,4	580,4
35	0,05732	1,0059	25,25	0,1205	1,9947	34,98	612,5	577,5
40	0,07519	1,0078	19,56	0,1366	1,9718	39,97	614,7	574,7
45	0,09770	1,0099	15,28	0,1524	1,9497	44,96	616,8	571,8
50	0,12577	1,0121	12,05	0,1679	1,9286	49,94	618,9	569,0
55	0,16050	1,0146	9,683	0,1832	1,9082	54,94	621,0	566,1
60	0,2031	1,0172	7,682	0,1983	1,8887	59,93	623,1	563,2
65	0,2550	1,0200	6,205	0,2132	1,8698	64,93	625,1	560,2
70	0,3178	1,0229	5,047	0,2279	1,8517	69,93	627,2	557,3
75	0,3931	1,0260	4,135	0,2424	1,8342	74,94	629,2	554,3
80	0,4829	1,0293	3,410	0,2567	1,8173	79,95	631,2	551,2
85	0,5894	1,0327	2,829	0,2708	1,8011	84,96	633,1	548,1
90	0,7149	1,0363	2,361	0,2847	1,7854	89,98	635,0	545,0
95	0,8619	1,0400	1,982	0,2984	1,7702	95,01	636,9	541,9
100	1,0332	1,0438	1,673	0,3120	1,7555	100,05	638,8	538,8
105	1,2318	1,0479	1,419	0,3254	1,7413	105,09	640,6	535,5
110	1,4609	1,0520	1,210	0,3387	1,7276	110,14	642,4	532,3
115	1,7239	1,0563	1,036	0,3518	1,7143	115,2	644,2	529,0
120	2,0245	1,0608	0,8913	0,3647	1,7014	120,3	645,9	525,6
125	2,3666	1,0654	0,7709	0,3775	1,6890	125,3	647,6	522,3
130	2,7544	1,0702	0,6679	0,3902	1,6769	130,4	649,3	518,9
135	3,192	1,0751	0,5817	0,4028	1,6652	135,5	650,9	515,4
140	3,685	1,0802	0,5083	0,4152	1,6538	140,7	652,5	511,8
145	4,237	1,0855	0,4459	0,4275	1,6427	145,8	654,0	508,2
150	4,854	1,0910	0,3924	0,4397	1,6319	150,9	655,5	504,6
155	5,540	1,0966	0,3464	0,4518	1,6214	156,1	657,0	500,9
160	6,302	1,1024	0,3068	0,4637	1,6112	161,3	658,4	497,1
165	7,146	1,1085	0,2724	0,4756	1,6012	166,5	659,7	493,2
170	8,076	1,1147	0,2426	0,4874	1,5914	171,7	661,0	489,3

Tabelul 5.22 (continuare)

Temperatura t C°	Presiunea p at	Volumul specific		Entropia		Entalpia		Căldura latentă de vaporizare r kcal/kg
		apă v' dm³/kg	abur v'' m³/kg	apă s' kcal/kg·grd	abur s'' kcal/kg·grd	apă i' kcal/kg	abur i'' kcal/kg	
175	9,101	1,1211	0,2166	0,4991	1,5818	176,9	662,3	485,4
180	10,225	1,1278	0,1939	0,5107	1,5724	182,2	663,4	481,2
185	11,456	1,1347	0,1739	0,5222	1,5632	187,4	664,5	477,1
190	12,800	1,1418	0,1564	0,5337	1,5541	192,8	665,5	472,7
195	14,265	1,1491	0,1409	0,5450	1,5451	198,1	666,4	468,3
200	15,857	1,1568	0,1273	0,5563	1,5363	203,5	667,3	463,8
205	17,585	1,1647	0,1151	0,5676	1,5276	208,9	668,0	459,1
210	19,456	1,1729	0,1043	0,5788	1,5189	214,3	668,6	454,3
215	21,478	1,1814	0,09471	0,5899	1,5103	219,7	669,2	449,5
220	23,659	1,1903	0,08611	0,6010	1,5017	225,2	669,6	444,4
225	26,007	1,1994	0,07841	0,6120	1,4932	230,8	669,9	439,1
230	28,531	1,2090	0,07149	0,6230	1,4847	236,4	670,0	433,6
235	31,239	1,2190	0,06527	0,6340	1,4762	242,0	670,1	428,1
240	34,140	1,2293	0,05967	0,6450	1,4677	247,7	670,0	422,3
245	37,244	1,2402	0,05460	0,6559	1,4592	253,4	669,8	416,4
250	40,56	1,2515	0,05002	0,6668	1,4507	259,2	669,4	410,2
255	44,10	1,2633	0,04586	0,6777	1,4421	265,0	668,8	403,8
260	47,87	1,2757	0,04208	0,6886	1,4335	270,9	668,1	397,2
265	51,88	1,2888	0,03865	0,6996	1,4248	276,9	667,3	390,4
270	56,14	1,3025	0,03552	0,7105	1,4161	282,9	666,3	383,4
275	60,66	1,3169	0,03266	0,7215	1,4073	289,0	665,1	376,1
280	65,46	1,3322	0,03005	0,7324	1,3984	295,2	663,7	368,5
285	70,54	1,3483	0,02766	0,7435	1,3894	301,5	662,1	360,6
290	75,92	1,3655	0,02546	0,7546	1,3804	307,9	660,4	352,5
295	81,60	1,3837	0,02345	0,7658	1,3712	314,4	658,5	344,1
300	87,61	1,4033	0,02160	0,7770	1,3620	321,1	656,3	335,2
305	93,95	1,4024	0,01989	0,7884	1,3526	327,8	654,0	326,2
310	100,64	1,447	0,01832	0,7990	1,3431	334,7	651,5	316,8
315	107,69	1,471	0,01687	0,8115	1,3337	341,8	648,9	307,1
320	115,12	1,498	0,01549	0,8234	1,3232	349,0	645,5	296,5
325	122,95	1,527	0,01420	0,8354	1,3118	356,5	641,5	285,0
330	131,18	1,560	0,01298	0,8478	1,2999	364,2	636,9	272,7
335	139,85	1,598	0,01183	0,8605	1,2870	372,2	631,6	259,4
340	148,96	1,638	0,01076	0,8736	1,2735	380,6	625,8	245,2
345	158,54	1,687	0,009765	0,8874	1,2595	389,4	619,4	230,0
350	168,63	1,746	0,008803	0,9021	1,2441	398,9	612,0	213,1
355	179,24	1,817	0,007878	0,9179	1,2270	409,5	603,6	194,1
360	190,42	1,908	0,006867	0,9353	1,2072	420,9	593,1	172,2
365	202,21	2,03	0,00604	0,9557	1,1833	434,2	579,4	145,2
370	214,68	2,23	0,00499	0,9824	1,1481	452,3	558,9	106,6
374	225,22	2,79	0,00362	1,033	1,086	488,0	522,5	34,5

Apă în fierbere

6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40 42 °C

0,01 0,02 0,03 0,04 0,05 0,06 0,07 0,08 at

Entalpii:

pînă la 196 °C se adaugă 100 $\frac{kcal}{kg}$ *Exemplu:* 165 °C $i' = 66{,}5 + 100 = 166{,}5 \frac{kcal}{kg}$

de la 197 °C se adaugă 200 $\frac{kcal}{kg}$ *Exemplu:* 197 °C $i' = 0{,}2 + 200 = 200{,}2 \frac{kcal}{kg}$

45 50 55 60 65 70 75 °C

0,08 0,09 0,10 0,12 0,14 0,16 0,18 0,20 0,25 0,30 0,35 0,40 at

0,05 1,06 2,06 3,07 4,08 5,09 6,10 7,11 8,12 9,13 10,14 11,15 12,16 13,17 kcal/kg

80 85 90 95 100 105 110 °C

0,45 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 1,6 at

13,17 14,19 15,20 16,21 17,23 18,24 19,25 20,3 21,3 22,3 23,3 24,3 25,3 26,4 27,4 28,4 29,4 30,4 31,5 32,5 33,5 34,5 35,5 36,6 37,6 38,6 39,6 40,7 41,7 42,7 43,7 44,8 45,8 46,8 47,8 48,9 49,9 kcal/kg

115 120 125 130 135 140 145 °C

1,7 1,8 1,9 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 4,5 at

48,9 49,9 50,9 52,0 53,0 54,0 55,1 56,1 57,1 58,2 59,2 60,2 61,3 62,3 63,3 64,4 65,4 66,5 67,5 68,5 69,6 70,6 71,7 72,7 73,8 74,8 75,9 76,9 78,0 79,0 80,1 81,1 82,2 83,2 84,3 85,3 86,4 kcal/kg

150 155 160 165 170 175 180 °C

5,0 5,5 6,0 6,5 7,0 7,5 8,0 8,5 9,0 9,5 10,0 10,5 11,0 at

85,3 86,4 87,4 88,5 89,6 90,6 91,7 92,8 93,8 94,9 96,0 97,0 98,1 99,2 0,2 1,3 2,4 3,5 4,5 5,6 6,7 7,8 8,9 9,9 11,0 12,1 13,2 14,3 15,4 16,5 17,6 18,6 19,7 20,8 21,9 23,0 24,1 kcal/kg

185 190 195 200 205 210 215 °C

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 at

23,0 24,1 25,2 26,3 27,5 28,6 29,7 30,8 31,9 33,0 34,1 35,2 36,4 37,5 38,6 39,7 40,9 42,0 43,1 44,3 45,4 46,5 47,7 48,8 49,9 51,1 52,2 53,4 54,5 55,7 56,9 58,0 59,2 60,3 61,5 62,7 63,8 kcal/kg

220 225 230 235 240 245 250 °C

23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 at

Fig. 5.53. Scările presiune — temperatură — entalpie.

kcal/kg

950 900 850 800 750 700 650 600 550 500 450 400

300 at 250 200 160 140 120 100 90 80 70 60 50 40 30 20 15 10 9,0 8,0 7,0 6,0 5,0 4,0 3,0 2,0 1,0 0,50 0,40 0,30 0,20 0,10 0,05 0,04 0,03 0,02 0,01 at

700 °C 650° 600° 550° 500° 450° 400° 350° 300° 250° 200° 150° 100° 50°

Temperatura aburului, în °C

Titlul aburului x

x = 0,95 0,90 0,85 0,80 0,75 0,70

Presiunea aburului, p în at

1,3 1,4 1,5 1,6 1,7 1,8 1,9 2,0 2,1

→ s kcal/kg·grd

Fig. 5.54. Diagrama *i*, *s* (Mollier) pentru abur: *i* — entalpia; *s* — entropia.

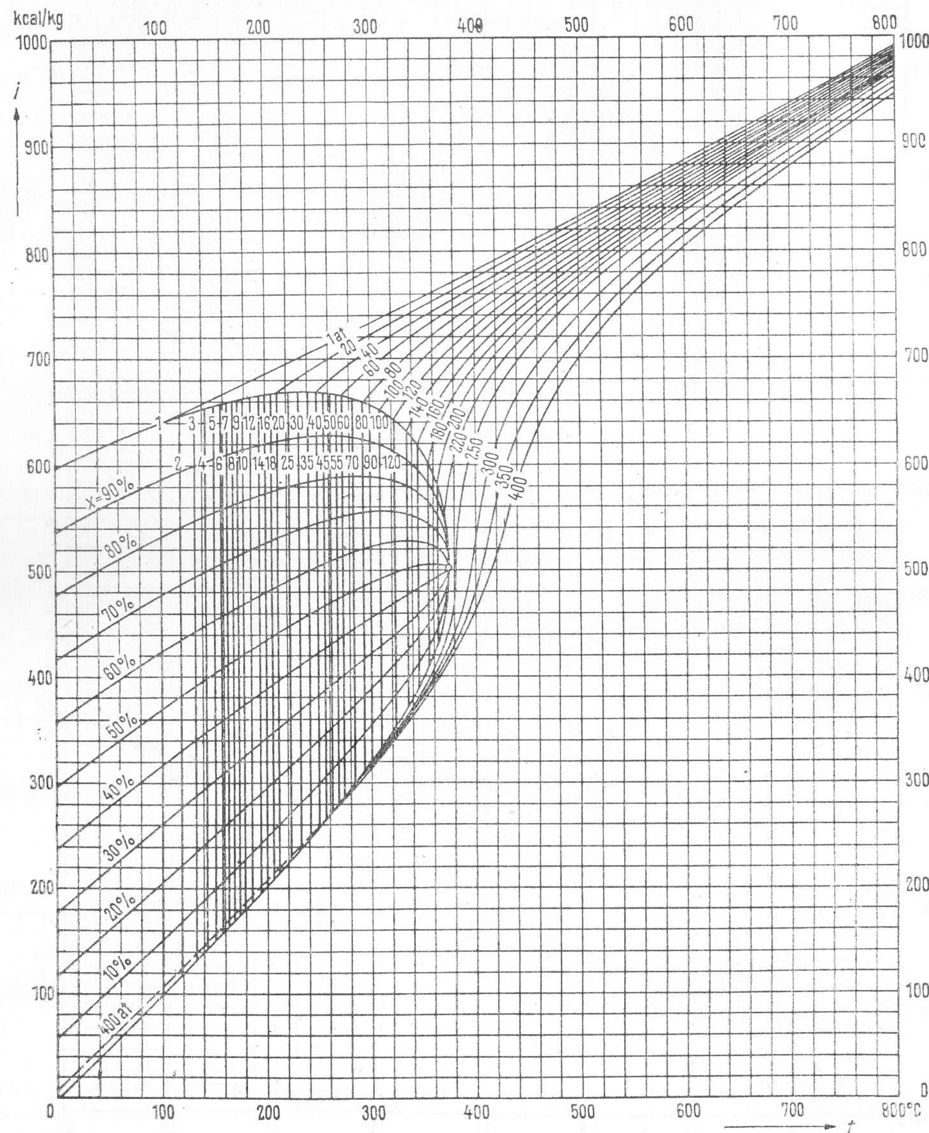


Fig. 5.55. Diagrama i, t pentru abur: i — entalpia; t — temperatura.

Tabelul 5.23. **Mărimile de stare ale apei grele (D_2O) și aburului provenit din apa grea la saturație**

Temperatura t C°	Presiunea p at	Volumul specific		Entropia[1])		Entalpia [1])		Căldura latentă de vaporizare r kcal/kg
		apă v' dm³/kg	abur v'' m³/kg	apă s' kcal/kg · grd	abur s'' kcal/kg · grd	apă i' kcal/kg	abur i'' kcal/kg	
3,82	0,0060	0,9019	169,5	0	2,0012	0	554,27	554,27
5	0,0074	0,9019	156,3	0,0048	1,9945	1,17	554,74	553,57
10	0,0106	0,9022	111,8	0,0224	1,9670	6,24	556,75	550,51
15	0,0149	0,9028	81,13	0,0398	1,9407	11,30	558,76	547,45
20	0,0206	0,9037	59,56	0,0570	1,9155	16,36	560,77	544,40
25	0,0282	0,9084	44,24	0,0740	1,8914	21,42	562,77	541,35
30	0,0382	0,9062	33,23	0,0907	1,8683	26,46	564,77	538,30
35	0,0512	0,9077	25,24	0,1072	1,8462	31,50	566,76	535,26
40	0,0677	0,9094	19,36	0,1234	1,8251	36,52	568,74	532,22
45	0,0888	0,9114	15,00	0,1393	1,8048	41,54	570,72	529,18
50	0,1153	0,9134	11,73	0,1550	1,7853	46,54	572,68	526,13
55	0,1482	0,9157	9,263	0,1704	1,7666	51,54	574,64	523,09
60	0,1889	0,9181	7,373	0,1855	1,7487	56,53	576,58	520,04
65	0,2388	0,9207	5,917	0,2004	1,7315	61,51	578,50	516,98
70	0,2993	0,9234	4,785	0,2151	1,7150	66,49	580,41	513,92
75	0,3724	0,9262	3,898	0,2295	1,6991	71,46	582,30	510,84
80	0,4599	0,9292	3,198	0,2437	1,6839	76,43	584,17	507,74
85	0,5640	0,9323	2,641	0,2576	1,6692	81,39	586,02	504,62
90	0,6871	0,9356	2,195	0,2714	1,6550	86,35	587,85	501,49
95	0,8317	0,9390	1,835	0,2849	1,6414	91,31	589,65	498,33
100	1,00	0,9425	1,543	0,2982	1,6282	96,27	591,42	495,14
105	1,19	0,9462	1,305	0,3114	1,6155	101,24	593,17	491,93
110	1,42	0,9500	1,109	0,3244	1,6032	106,20	594,89	488,68
115	1,68	0,9540	0,9478	0,3372	1,5913	111,16	596,57	485,40
120	1,98	0,9581	0,8134	0,3498	1,5799	116,13	598,22	482,08
125	2,32	0,9623	0,7011	0,3623	1,5687	121,11	599,84	478,73
130	2,71	0,9667	0,6069	0,3747	1,5579	126,08	601,42	475,33
135	3,14	0,9712	0,5275	0,3869	1,5475	131,07	602,96	471,88
140	3,64	0,9759	0,4602	0,3990	1,5373	136,06	604,45	468,39
145	4,19	0,9808	0,4030	0,4110	1,5274	141,06	605,91	464,84
150	4,81	0,9858	0,3540	0,4229	1,5177	146,07	607,32	461,24
155	5,49	0,9909	0,3121	0,4346	1,5083	151,09	608,68	457,58
160	6,26	0,9963	0,2759	0,4463	1,4992	156,12	609,99	453,86
165	7,11	1,001	0,2447	0,4578	1,4902	161,16	611,25	450,08
170	8,05	1,007	0,2176	0,4693	1,4814	166,22	612,45	446,22
175	9,08	1,013	0,1940	0,4807	1,4729	171,30	613,59	442,29
180	10,21	1,019	0,1735	0,4920	1,4644	176,39	614,68	438,28
185	11,46	1,025	0,1554	0,5032	1,4562	181,51	615,70	434,19
190	12,81	1,032	0,1396	0,5144	1,4481	186,64	616,65	430,00
195	14,30	1,039	0,1256	0,5255	1,4401	191,80	617,54	425,73
200	15,91	1,046	0,1133	0,5365	1,4322	196,99	618,35	421,35
205	17,66	1,053	0,1024	0,5475	1,4245	202,21	619,09	416,87
210	19,56	1,061	0,09273	0,5585	1,4168	207,46	619,75	412,28
215	21,62	1,069	0,08410	0,5694	1,4093	212,75	620,33	407,57
220	23,83	1,077	0,07640	0,5803	1,4018	218,08	620,82	402,74
225	26,22	1,085	0,06952	0,5911	1,3944	223,45	621,23	397,78
230	28,79	1,094	0,06335	0,6020	1,3871	228,87	621,55	392,67
235	31,55	1,103	0,05781	0,6128	1,3798	234,35	621,78	387,42
240	34,50	1,113	0,05283	0,6237	1,3726	239,88	621,90	382,01
245	37,66	1,123	0,04833	0,6345	1,3654	245,48	621,92	376,44

Tabelul 5.23 (continuare)

Temperatura t °C	Presiunea p at	Volumul specific		Entropia [1])		Entalpia[1])		Căldura latentă de vaporizare r kcal/kg
		apă v' dm³/kg	abur v'' m³/kg	apă s' kcal/kg·grd	abur s'' kcal/kg·grd	apă i' kcal/kg	abur i'' kcal/kg	
250	41,03	1,134	0,04427	0,6454	1,3582	251,15	621,84	370,69
255	44,63	1,145	0,04059	0,6563	1,3510	256,89	621,64	364,75
260	48,46	1,156	0,03726	0,6672	1,3438	262,71	621,32	358,61
265	52,53	1,168	0,03423	0,6782	1,3366	268,61	620,87	352,26
270	56,86	1,181	0,03147	0,6893	1,3294	274,61	620,29	345,68
275	61,44	1,195	0,02895	0,7004	1,3221	280,71	619,57	338,85
280	66,31	1,209	0,02665	0,7116	1,3148	286,91	618,69	331,77
285	71,45	1,225	0,02454	0,7229	1,3074	293,24	617,65	324,41
290	76,89	1,241	0,02261	0,7344	1,2998	299,68	616,43	316,74
295	82,64	1,258	0,02083	0,7459	1,2922	306,26	615,01	308,75
300	88,71	1,277	0,01919	0,7577	1,2843	312,98	613,38	300,40
305	95,11	1,297	0,01768	0,7695	1,2763	319,85	611,53	291,67
310	101,87	1,319	0,01628	0,7816	1,2680	326,88	609,41	282,52
315	109,00	1,343	0,01497	0,7939	1,2595	334,10	607,01	272,91
320	116,51	1,369	0,01376	0,8064	1,2506	341,50	604,28	262,77
325	124,45	1,397	0,01263	0,8192	1,2413	349,12	601,18	252,05
330	132,81	1,430	0,01157	0,8323	1,2314	356,98	597,65	240,67
335	141,65	1,466	0,01057	0,8458	1,2210	365,11	593,63	228,52
340	150,99	1,507	0,009632	0,8598	1,2099	373,57	589,04	215,45
345	160,87	1,556	0,008740	0,8743	1,1979	382,45	583,77	201,32
350	171,34	1,616	0,007892	0,8897	1,1849	391,93	577,75	185,81

[1]) Punctul zero pentru entalpie şi entropie la punctul triplu la $t = 3{,}82$ °C.

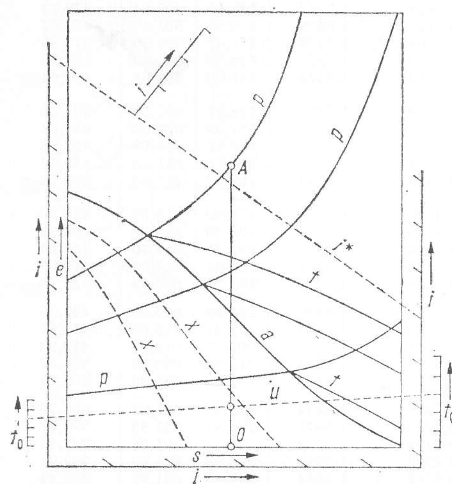


Fig. 5.56. Diagrama exergiei aburului. Temperatura ambiantă $t_0 = 0$ °C: a — curba limită superioară; p — izobare; t — izoterme; x — curbe de titlu constant; i — scări (laterale) pentru entalpie; t_0 — scări (laterale) pentru temperatura mediului ambiant; i^* — curbe izentalpice; u — curba temperaturii mediului ambiant $t_0 > 0$°C.

Calculul exergiei (energia disponibilă)

$$e = (i - i_0) - T_0 (s - s_0) \text{ (kcal/kg)}.$$

Entropia este reprezentată în diagramă în abscisă, în kcal/kg·grd, iar exergia în kcal/kg în ordonată. Pe lîngă curba limită superioară, sînt reprezentate izotermele, izobarele şi curbele de titlu constant. Scările laterale permit determinarea curbelor de entalpie constantă (preferabil în culori), acestea fiind linii drepte care unesc puncte similare de pe scara din partea stîngă şi de pe scara din partea dreaptă.

Exergia pentru temperatura ambiantă $t_0 =$ 0°C poate fi citită direct. Pentru temperatura ambiantă $t_0 >$ 0°C, trebuie trasată mai întîi curba mediului ambiant, între punctele corespunzătoare de pe scara din partea stîngă şi de pe scara din partea dreaptă.

Exergia se găseşte ca distanţă izentropică a punctului de stare faţă de curba mediului ambiant.

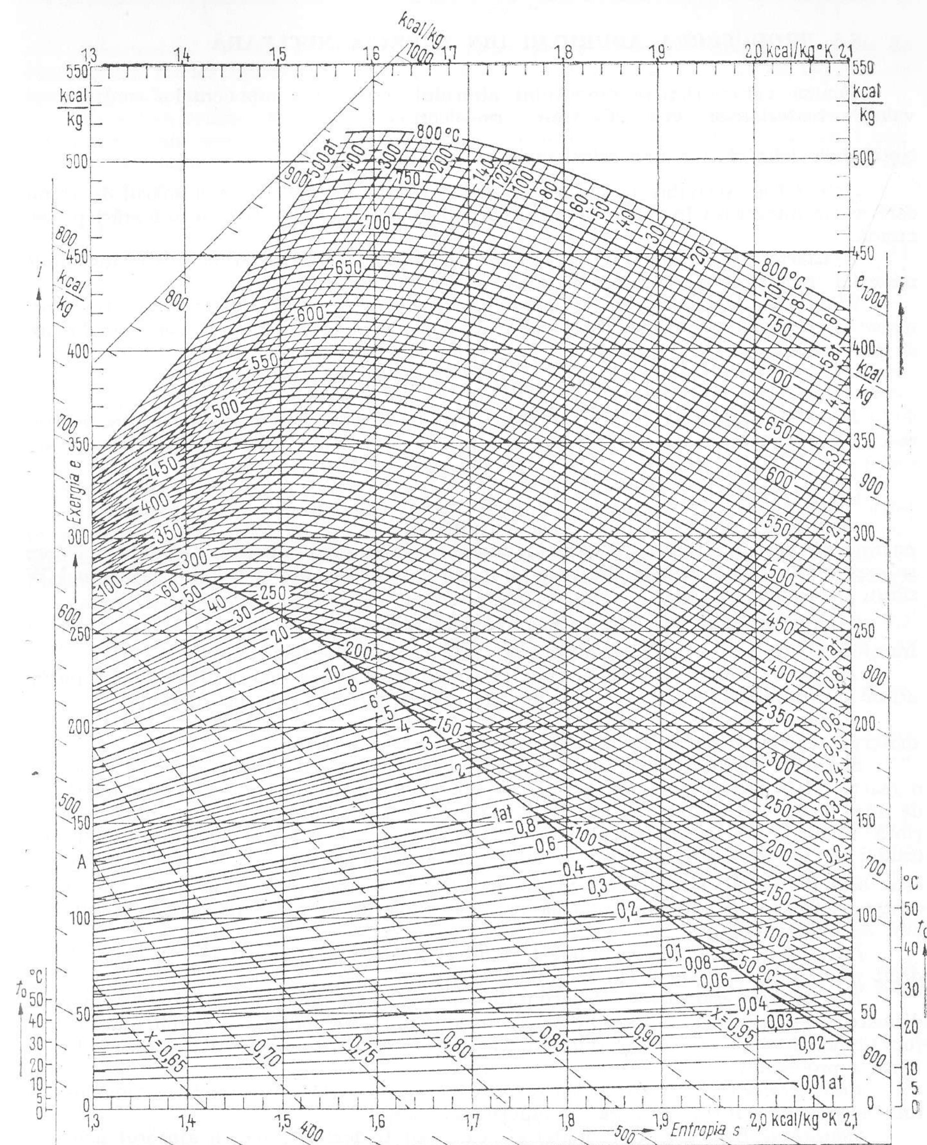


Fig. 5.56 b.

5.5. PRODUCEREA ABURULUI DIN ENERGIA NUCLEARĂ

Pentru caracteristicile circuitului aburului, calculul componentelor centralei şi valorile materialelor, vezi „Centrale termoelectrice".

Noţiuni de tehnică a reactoarelor nucleare

Activitatea. Activitatea unui nuclid sau material radioactiv este numărul de atomi care se dezintegrează în unitatea de timp. 1 Ci(curie) = 3,7 × 10^{10} dezintegrări pe secundă.

Reactorul reproducător este un reactor care produce din materiale fertile mai mult material fisionabil decît consumă pentru a produce energie.

Materialele reproducătoare sau materialele fertile sînt materialele care sînt transformate în materiale fisionabile prin captarea de neutroni şi eliberarea corespunzătoare de particule β



$$^{238}U \rightarrow {}^{239}Pu, \qquad {}^{232}Th \rightarrow {}^{233}U.$$

Reproducerea este raportul dintre cantitatea de material fisionabil produs într-un reactor reproducător şi cantitatea consumată. El depinde de perioada de lucru a reactorului.

Gradul de ardere

p e n t r u m a t e r i a l e f i s i o n a b i l e:
energia termică produsă pe unitatea de masă de combustibil nuclear. Gradul de ardere se exprimă de obicei în MW zile/tona de metal greu (de exemplu uraniu), adică în MW zile/t.

p e n t r u m a t e r i a l e n e f i s i o n a b i l e:
fracţiunea dintr-un nuclid transformat prin captarea de neutroni.

Barele de control absorb neutronii; ele sînt introduse mai mult sau mai puţin adînc într-o reţea de găuri din reactor, pentru a influenţa reacţia în lanţ.

Reactorul convertor este un reactor care produce din materiale fertile mai puţin material fisionabil decît consumă pentru producerea energiei.

Secţiunea eficace este o măsură a probabilităţii ca o particulă sau foton să producă o reacţie cînd este dirijat spre un material (de exemplu secţiuni eficace de împrăştiere, de absorbţie şi de fisiune). Secţiunea eficace microscopică σ poate fi imaginată ca aria-ţintă a unei singure particule pentru radiaţie; ea depinde atît de materialul iradiat, cît şi de energia radiaţiei. Unitatea de măsură a secţiunii eficace microscopice este barnul (b); 1b = 10^{-24} cm^2. Secţiunea eficace microscopică $\Sigma(cm^{-1})$ este produsul dintre secţiunea eficace microscopică (cm^2) şi numărul de particule conţinute într-un cm^3 de substanţă-ţintă.

Îmbogăţirea. Uraniul este îmbogăţit cînd el prezintă un conţinut de ^{235}U mai ridicat decît uraniul natural de 0,714 la sută ^{235}U.

Reactivitatea echivalentă. Reactivitatea unui reactor poate fi schimbată prin modificarea poziţiei unui component al reactorului sau prin modificarea unui parametru funcţional. Schimbarea care rezultă în reactivitate este denumită reactivitatea echivalentă a procesului.

Reactivitatea în exces este valoarea pozitivă a reactivităţii care trebuie compensată într-un reactor critic la o stare de funcţionare dată.

Substanţele fisionabile sînt materiale care pot fi dezintegrate cu ajutorul neutronilor, adică absorbţia de neutroni de către acestea conduce în majoritatea cazurilor la fisiune nucleară (^{235}U, ^{233}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu).

Otrăvirea cu produse de otrăvire este prezenţa nuclizilor produsă de procesele de dezintegrare nucleară dintr-un reactor, care au o secţiune eficace mare de captură de neutroni, reducînd astfel reactivitatea în exces a reactorului.

Elementul combustibil este un ansamblu de bare combustibile asamblate cu ajutorul materialelor structurale, ca de exemplu piese de distanţare, benzi de capăt etc.

Bara combustibilă este o cantitate de combustibil nuclear, de exemplu pastile de UO_2 sinterizat, închise într-o teacă tubulară.

Apa grea este D_2O. Deuteriul este un izotop al hidrogenului de masă 2 care conţine hidrogen natural pînă la 0,014%.

Moderatorul este o substanţă care absoarbe neutronii într-o proporţie limitată şi care încetineşte neutronii de fisiune prin ciocniri elastice, de la energia iniţială ridicată a acestora (valoarea medie 2 MeV) pînă la energia termică (< 0,5 eV) într-un timp foarte scurt (10^{-5} – 10^{-4} s). Se utilizează în mod frecvent H_2O, D_2O sau grafitul.

Factorul de multiplicare k_∞ este numărul de neutroni rezultaţi prin fisiune într-o generaţie, raportat la numărul de neutroni absorbiţi în precedenta generaţie într-un reactor presupus infinit de mare. Factorul de multiplicare efectiv sau raportul de reproducere k_{ef} ia în consideraţie faptul că unii neutroni scapă în mediul înconjurător în timpul producerii prin suprafaţa de fisiune.

Densitatea fluxului de neutroni (cm^{-2} s^{-1}) este suma vitezelor tuturor neutronilor liberi prezenţi în 1 cm^3.

Reactoarele nucleare sînt instalaţii în care atomii utilizaţi drept combustibil nuclear sînt dezintegraţi cu ajutorul neutronilor într-o reacţie în lanţ autoîntreţinută, din care se produce energie. Depinzînd de parametrii de transformare ai instalaţiei, în timpul acestui proces se poate produce mai mult combustibil nuclear. Se face distincţie între reactoarele termice, epitermice (intermediare) şi reactoarele rapide, după cum fisiunea este cauzată în principal de neutroni cu o energie < 0,5 eV, de la 0,5 eV la 0,1 MeV, sau > 0,01 MeV. Intervalele de energie ale neutronilor din reactoare uneori se suprapun.

Centrala nucleară electrică este o centrală termoelectrică cu abur care foloseşte ca sursă de căldură un reactor nuclear.

Bilanţul reactivităţii este comparaţia excesului maxim de reactivitate cu toate reactivităţile echivalente corespunzătoare. Bilanţul reactivităţii depinde de modul de exploatare a reactorului şi de funcţionarea sa anterioară.

Reactor cu ţevi sub presiune. Ţevile sub presiune conţin agentul de răcire; ele înconjoară elementele combustibile. Moderatorul şi reflectorul sînt la presiune scăzută.

Reactorul cu vas de presiune. Un reactor în care presiunea agentului de răcire este conţinută de un vas de presiune care înconjoară zona activă a reactorului şi componentele sale interne.

Coeficientul de reactivitate este coeficientul diferenţial de reactivitate raportat la un parametru funcţional, ca temperatura sau presiunea, care îl influenţează.

Viteza reactivităţii este coeficientul de reactivitate diferenţial raportat la timp.

Reactivitatea este o măsură a deviaţiei reactorului de la starea critică. Se defineşte prin următoarea relaţie:

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}}$$

în care ρ este reactivitatea şi k_{ef} este factorul de multiplicare efectiv.

Un reactor este critic atunci cînd k_{ef} = 1 şi prin urmare ρ = 0.

Combustibilul reactorului este un amestec de substanţe fisionabile şi fertile, în majoritate oxizi, carburi sau metale (de exemplu UO_2, amestec de oxizi de Th-U).

Reflectorul. Acesta este o substanţă moderatoare dispusă în jurul zonei active a reactorului pentru a preveni pierderile prin scăpare de neutroni.

Reactivitatea de oprire este reactivitatea reactorului după oprirea prin mijloacele uzuale. Ea depinde, în general, de metoda de exploatare a reactorului şi de durata ciclului de oprire şi este întotdeauna negativă (vezi de asemenea şi reactivitatea).

Combustibili nucleari, tipuri de reactoare, gradul de ardere a combustibilului

Tabelul 5.24. **Materiale de fisiune primare şi secundare şi materiale fertile**

Materiale de fisiune primare (naturale): Uraniu, natural, care conţine 0,714% ^{235}U Uraniu îmbogăţit, care conţine > 0,714% ^{235}U	fisiune cu neutroni termici şi rapizi
Materiale secundare (artificiale) de fisiune: ^{233}U, obţinut din ^{232}Th ^{239}Pu, obţinut din ^{238}U	fisiune cu neutroni termici şi rapizi
Materiale fertile: Uraniu ^{238}U, poate fi format în Pu prin, ^{232}Th poate fi transformat în ^{233}U prin	neutroni rapizi

Dependenţa duratei de serviciu a elementelor combustibile şi a costului combustibilului de gradul de ardere: durata de serviciu a elementelor combustibile în reactor se calculează cu relaţia

$$t_{st} = \frac{B_u}{L_{sp}} \quad \text{(în zile de plină sarcină)}$$

în care B_u este gradul mediu de ardere, în MW zile/t uraniu;

L_{sp} — puterea specifică medie a combustibilului, în MW/t.

Tabelul 5.25 **Tipuri de reactoare de putere**

Tipul	Combustibil	Moderator	Agent de răcire	Temperatura	Gradul de ardere MW zile/t	Exemplu ¹)
Convertor termic	Uraniu natural sau uşor îmbogăţit	D_2O	D_2O (apă sub presiune)	joasă	8000	MZFR
		D_2O	H_2O (apă în fierbere)	joasă	(uraniu natural)	SGHWR
		D_2O	CO_2	înaltă		KKN
		C(grafit)	CO_2	joasă	4000	Calder Hall
	Uraniu îmbogăţit	C(grafit)	CO_2	înaltă	20 000	AGR
		H_2O	H_2O (apă sub presiune)			KWO
		H_2O	H_2O (apă în fierbere)	joasă	25 000	KRB

Tabelul 5.25 (continuare)

Tipul	Combustibil	Moderator	Agent de răcire	Temperatura	Gradul de ardere MW zile/t	Exemplu ¹)
Reproducător rapid	$Pu/^{238}U$	— —	NA H_2O (abur)	înaltă înaltă	100 000	BN 350 (USSR)
Reproducător termic	$^{233}U/Th$	D_2O C	D_2O CO_2, He	joasă înaltă	30 000 60 000	(AVR)

¹) MZFR Mahrzweck — Forschungsreaktor Karlsruhe (Siemens); SGHWR Steam Generating Heavy Water Reactor, Winfrith; KKN Kernkraftwerk Niederaichbach (Siemens); AGR Advanced Gas-cooled Reactor, e.g. Dungeness B; KWO Kernkraftwerk Obrigheim (Siemens); KRB Kernkraftwerk RWE Beyernwerk (AEG); AVR Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich (BBC-Krupp).

Costul combustibilului k_v pentru 1 kWh (fără investiţiile capitale pentru prima zonă activă) produsă de combustibilul nuclear se calculează cu relaţia

$$k_v = \frac{\Sigma K}{24\, m_u\, \eta B_u}$$

în care: K sînt costurile individuale, conform tabelului 5.26;
m_u — cantitatea de uraniu în zona activă nouă, în kg;
η — randamentul general al instalaţiei;
B_u — gradul mediu de ardere, în MWzile/t uraniu.

Tabelul 5.26. **Parametrii de cost pentru calculul costului combustibilului**

Cheltuieli	Venituri
Costul uraniului (elemente combustibile noi) Costuri de fabricaţie (de la UF_2 la centrala electrică) Cheltuieli de exploatare: Depozitarea elementelor combustibile uzate Transportul elementelor combustibile uzate Retratarea elementelor combustibile uzate Retransformarea nitratului de U în UF_6 Transformarea nitratului de Pu în Pu Transportul UF_6 şi Pu	Valoarea uraniului rezidual Valoarea Plutoniului $^{239}Pu + ^{241}Pu$

Economia de neutroni a reactorului

Secţiunea eficace macroscopică este

$$\Sigma = N\sigma \times 10^{24} = \frac{\rho_d}{A_r} N_A \sigma \times 10^{24}\ \text{cm}^{-1},$$

în care: N este numărul de atomi pe cm^3;
σ — secţiunea eficace microscopică, în barni (1 barn $= 10^{-24}$ cm^2);
A_r — masa atomică relativă, în g/mol;
ρ_d — densitatea, în g/cm^3;

$$N_A = 6{,}02252 \times 10^{23}\ mol^{-1}\ \text{(numărul lui Avogadro).}$$

Tabelul 5.27. **Secţiunile microscopice eficace pentru neutronii termici în barni (10^{-24} cm^2) şi punctele de topire pentru diferite elemente**

Procesul		Împrăştierea σ_s	Absorbţia [1]) σ_a	Fisiunea σ_f	Punctul de topire °C
Al	aluminiu		0,215	—	660
B	bor	4	750	—	2000 + 2300
Be	beriliu	7	0,009	—	1315
Bi	bismut	9,0	0,032	—	271
Cd	cadmiu	7	2400	—	321
Cr	crom		2,90	—	1800
H	hidrogen	38	0,33	—	
K	potasiu		1,97	—	
Mg	magnesiu		0,059	—	650
Na	sodiu		0,49	—	
Ni	nichel		4,5	—	1455
Fe	fier	11	2,43	—	1500
^{239}Pu	plutoniu	...	1300	905	
U	uraniu natural	8,2	7,42	3,92	1133
^{235}U	izotop al uraniului	8,2	672	565	
^{238}U	izotop al uraniului	8,2	2,80	0	
Zr	zirconiu		0,18	—	1845
H_2O	apă uşoară		0,66	—	
D_2O	apă grea		0,0011	—	
C	carbon	4,8	0,0045	—	
O	oxigen	4,2	$< 0{,}2 \times 10^{-3}$	—	
^{135}Xe	xenon	4,3	$3{,}2 \times 10^6$	—	

[1]) Inclusiv fisiunea.

Densitatea fluxului de neutroni este:

$$\Phi = n\bar{v}\,[cm^{-2}\,s^{-1}]$$

în care: n este densitatea de neutroni pe cm^3;
$\bar{v}$ — viteza medie a neutronilor, în cm/s.

Factorul de multiplicare efectiv al reacţiei în lanţ este

$$k_{ef} = \frac{P_N}{A_N + L_N},$$

în care P_N este producţia de neutroni în unitatea de timp;
A_N — absorbţia de neutroni în unitatea de timp;
L_N — scurgerea de neutroni în unitatea de timp.

Tabelul 5.28. **Exemple de bilanţ al neutronilor pentru reactoarele termice (fierbinţi, plină sarcină, $k_{ef} = 1$)**

Reactor cu uraniu natural răcit şi moderat cu apă grea D_2O, cu vas de presiune $P_{el} = 50$ MW
Reactor cu uraniu îmbogăţit, răcit şi moderat cu apă uşoară H_2O, proaspăt încărcat, $P_{el} = 600$ MW

	D_2O	H_2O
Neutroni rapizi de fisiune (stare iniţială)	1000	1000
Pierderi prin scurgere de neutroni epitermici	30	15
Pierderi prin scurgere de neutroni termici	40	1
Absorbţie de rezonanţă la ^{238}U (→ Pu)	100	150
Captură în ^{238}U (→ Pu)	280	155
Captură în ^{235}U	70	42
Absorbţie în moderator şi agentul de răcire	13	50
Absorbţie în materiale structurale şi în O_2 formîndu-se bioxid de uraniu	27	35
Absorbţie în produsele de fisiune (Xe, Sm, etc.)	35	25
Absorbţie în bor	—	110
Fisiunea ^{235}U şi fisiunea rapidă	405	417
Neutroni rapizi de fisiune	1000	1000

Reactivitatea reactorului:

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}};$$

la un reactor subcritic

$$k_{ef} < 1,\ \rho < 0;$$

la un reactor critic

$$k_{ef} = 1,\ \rho = 0;$$

la un reactor supracritic

$$k_{ef} > 1,\ \rho > 0.$$

Contribuţiile de reactivităţi la schimbarea reactivităţii rezultă din relaţia

$$\rho = \Delta\rho_{RS} + \Delta\rho_B + \Delta\rho_X + \rho_{st} + \Gamma_{K(M)}\,\Delta T_K + \Gamma_U\,\Delta T_u + \Gamma_p\,\Delta p_k + \ldots$$

în care ρ_{RS} este reactivitatea barelor de control;
ρ_B — reactivitatea absorbantului de neutroni (de exemplu bor);
ρ_X — reactivitatea produselor de fisiune;
ρ_{st} — reactivitatea perturbaţiilor;
T_K — temperatura mediului de răcire, în K;

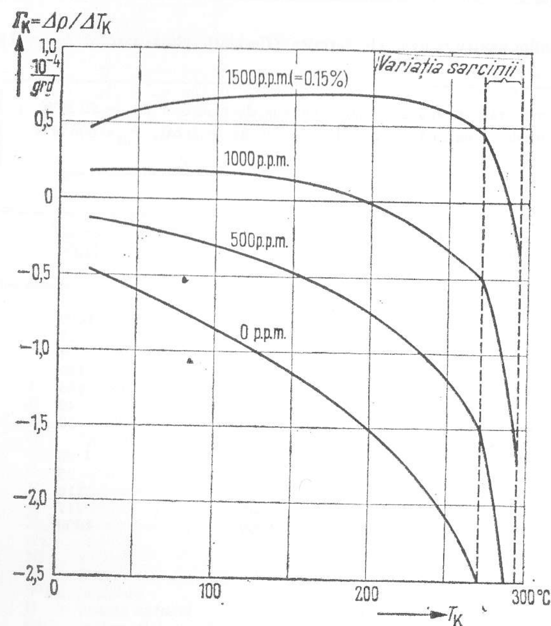


Fig. 5.57. Curbele caracteristice ale coeficientului de reactivitate a temperaturii agentului de răcire Γ_k la diferite concentrații de bor în funcție de temperatura agentului de răcire T_k.

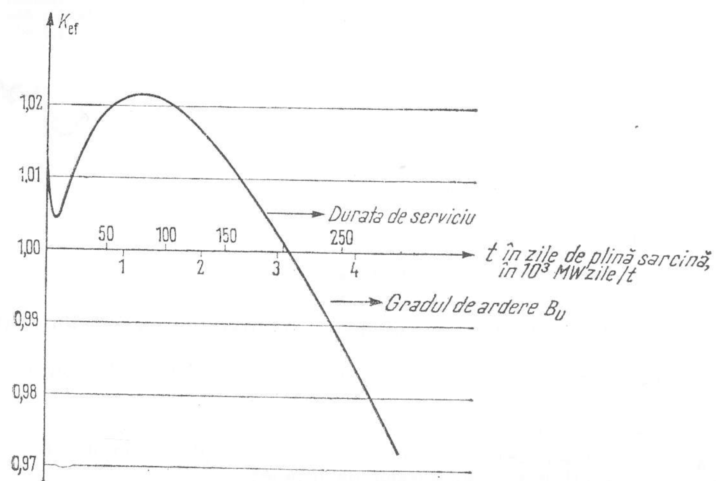


Fig. 5.58. Curbă caracteristică a factorului efectiv de multiplicare k_{ef} pentru un reactor cu apă grea în funcție de gradul de ardere B_u.

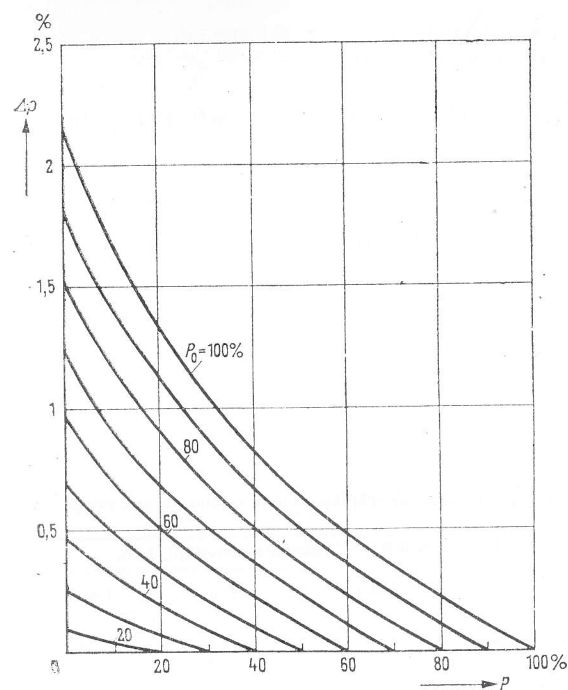


Fig. 5.59. Reactivitatea $\Delta\rho$ necesară trecerii vîrfului de otrăvire cu Xe după reducerea puterii într-o singură treaptă:
P_0 — puterea reactorului înainte de modificarea sarcinii;
P — puterea reactorului după modificarea sarcinii.

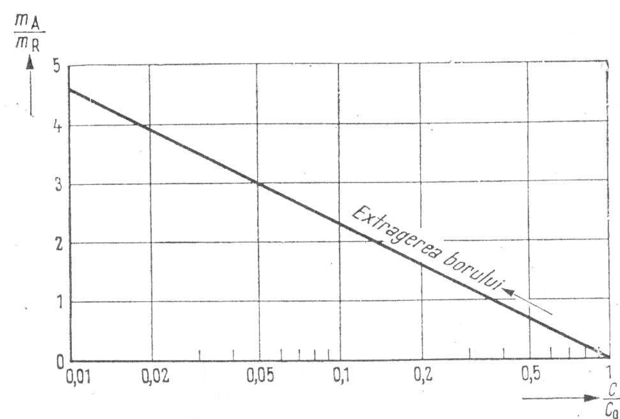


Fig. 5.60. Cantitățile efluente în cazul extragerii borului: C/C_0 — variația concentrației borului; m_A/m_R — cantitatea de efluent raportată la cantitatea principală de agent de răcire.

T_u este temperatura combustibilului, în °K;
p_k — presiunea mediului de răcire, în kgf/cm²;

$\Gamma_{K\,(M)} = \dfrac{\partial\rho}{\partial T_{K\,(M)}}$ — coeficientul de temperatură al reactivității mediului de răcire (moderator), în grd^{-1};

$\Gamma_u = \dfrac{\partial\rho}{\partial T_u}$ — coeficientul de temperatură al reactivității combustibilului, în grd^{-1} (coeficientul Doppler);

Γ_p — coeficientul de presiune al reactivității mediului de răcire (moderator), în (kgf/cm²)$^{-1}$.

Coeficienții de reactivitate ai reactoarelor cu apă sub presiune sînt:

$\Gamma_{K\,(M)} \approx (-45 ... +10) \times 10^{-5}$ grd^{-1} (v. fig. 5.57);

$\Gamma_u \approx (-3 ... -1) \times 10^{-5}$ grd^{-1} (de la funcționarea în gol la plină sarcină);

$\Gamma_p \approx 0$.

Tabelul 5.29. **Exemplu de bilanț de reactivitate pentru ciclul de echilibru al unui reactor cu apă sub presiune**

Starea reactorului	Valorile reactivității, în %		
	Reactor	Bor	Control
20 °C, neîncărcat, neotrăvit cu reactivitate de oprire		14,8	6,2
20 °C, neîncărcat, neotrăvit, la începutul ciclului ..	18	14,8	3,2
274,1 °C neîncărcat, neotrăvit, la începutul ciclului ..	14,5	11,3	3,2
297,6 °C plină sarcină, neotrăvit, la începutul ciclului	12,2	11,3	0,9
297,6 °C plină sarcină, echilibru Xe/Sm, la începutul ciclului	9,8	8,9	0,9
297,6 °C, plină sarcină, echilibru Xe/Sm la sfîrșitul ciclului	1,2	0,3	0,9

Controlul prin acid boric

Reactivitatea echivalentă a acidului boric este : 1 % $\Delta\rho \triangleq$ (80—120) p. p. m. bor. Variația debitului de alimentare în funcție de concentrația de acid boric este:

$$\frac{dC_R}{dt} = -\frac{\dot{m}_Z}{m_R}(C_R - C_Z).$$

Cantitățile efluente în cazul extragerii borului în funcție de alimentarea cu apă curată se obțin din:

$$\frac{m_A}{m_R} = -\ln\left(1 - \frac{\Delta C}{C_{R0}}\right)$$

$$C_Z = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_Z} C_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_Z} C_2 + ... \text{ și } \Delta C = C_{R0} - C_R,$$

în care $\dot{m}_Z$ este debitul de alimentare a circuitului de răcire al reactorului, în kg/h;
$\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$ — debitele parțiale (de exemplu apă curată, acid boric foarte concentrat etc.) în kg/h;
m_R — cantitatea de agent de răcire în circuitul de răcire al reactorului, în kg;
m_A — efluentul (cantitatea care se extrage), în kg;
C — concentrația de bor (greutatea de bor raportată la greutatea de lichid), în p.p.m.sau %;
C_R, C_Z, C_1, C_2 — concentrațiile de bor în mediul de răcire al reactorului, respectiv în debitul de alimentare și în debitele parțiale;
C — variația concentrației de bor în C/C_0 și C_1, C_2.

Puterea termică a reactorului

Puterea termică de fisiune a unui reactor este dată de relația

$$P_s = \frac{\Sigma_f V_u \bar{\Phi}_u}{S} \text{ [W]},$$

în care Σ_f este secțiunea eficace macroscopică de fisiune a uraniului, în cm^{-1};
V_u — volumul total de uraniu, în cm³;
$\bar{\Phi}_u$ — densitatea medie a fluxului de neutroni pentru volumul de uraniu, în cm^{-2} s^{-1};
$S = 3{,}1 \times 10^{10}$(Ws)$^{-1}$ — numărul reacțiilor de fisiune necesare pentru a genera 1 Ws.

Tabelul 5.30. **Bilanțul termic al unui reactor**

	Vas de presiune „moderator fierbinte"	Tub de presiune „moderator rece"
Puterea termică totală a reactorului.......................	100%	100%
Puterea termică efectivă a reactorului	99,9%	92%
Pierderi în moderator	—	6
Alte pierderi (răcirea protecției, radiația termică a circuitului de răcire a reactorului etc.)	0,1%	2
Căldura disipată după oprirea reactorului	(neglijabilă)	

Tabelul 5.31. **Energia (în MeV) eliberată prin fisiunea unui nucleu de ^{235}U**

	Total	Componentele căldurii
Energia cinetică a produselor de fisiune	168	168
Radiația gamma tranzitorie	5	5
Energia cinetică a neutronilor de fisiune	5	5
Radiația beta a produselor de fisiune	7	7
Radiația gamma a produselor de fisiune	6	6
Energia particulelor neutrino	10	—
Energia totală de fisiune	201 MeV	191 MeV
Radiațiile gamma la reacțiile (n, ν)	7	7
Radiația de la produsele (n, ν)		2
Energia totală eliberată la dezintegrarea nucleului	2	200 MeV [1]

[1] 1 MeV = 3,83 × 10^{-17} kcal = 1,6 × 10^{-13} Ws.

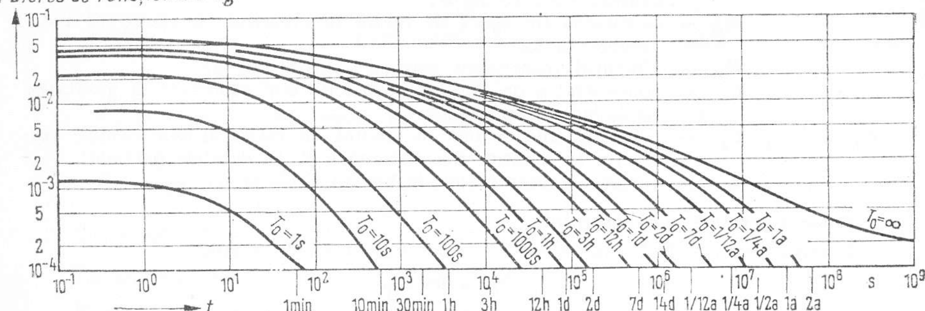


Fig. 5.61. Puterea termică relativă a radiaţiilor beta şi gamma din produsele de fisiune pentru un combustibil iradiat timp de T_0 zile, în funcţie de timpul t după oprirea reactorului; t este durata de funcţionare a reactorului.

Temperaturile şi fluxurile termice în barele de combustibil şi în canalul de răcire

Temperaturi admisibile ale combustibilului
uraniu (metalic): $< 665°C$ (schimbul de fază $\alpha \rightarrow \beta$);
bioxid de uraniu $<$ 2 800°C (punct de topire);
carbură de uraniu $<$ 2400°C (punct de topire).
Fluxul termic maxim admisibil al barei ($q_S < 700$ W/cm cu pastile de bioxid de uraniu la minimum 95% din densitatea teoretică) este:

$$q_S = 4\pi \int_{T_R}^{T_0} \lambda(T)\,\mathrm{d}T.$$

Variaţia tip a temperaturii în secţiunea transversală a barei de combustibil rezultă din:

$$\int_{T_R}^{T_r} \lambda(T)\,\mathrm{d}T = \frac{q_s}{4\pi}\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right).$$

Variaţia temperaturii suprafeţei învelişului de protecţie de-a lungul canalului de răcire pentru o distribuţie cosinusoidală a densităţii fluxului de neutroni (fără a considera efectele cuplării elementelor combustibile, dispozitivele de distanţare etc., la coeficient constant de transmisie a căldurii, fără curgere transversală, fierbere sau factori de siguranţă) este dată de relaţia:

$$T_H = T_K(z) + \frac{q_{s\,max}}{D_H \pi \alpha} \cos \frac{\pi z}{H'}.$$

Temperatura maximă a suprafeţei tubulare a învelişului de protecţie este:
- pentru reactoare cu apă sub presiune: $<$ 350°C (Zircaloy);
- pentru reactoare răcite cu gaz: $<$ 700°C (oţel inoxidabil).

Variaţia tip a temperaturii agentului de răcire de-a lungul canalului de răcire (cu aceleaşi ipoteze de mai sus) se obţine din relaţia:

$$T_K = T_{KE} + \frac{\Delta T_K}{2}\left(\frac{\sin \frac{\pi z}{H'}}{\sin \frac{\pi H}{2H'}} + 1\right).$$

Diferenţa de temperatură maximă a stratului limită dintre suprafaţa protecţiei tubulare şi mediul de răcire (aceleaşi ipoteze ca mai sus) are loc cînd $z = 0$:

$$\Delta T_{HKmax} = \frac{\Delta T_K}{2}\sqrt{\left[\frac{2(T_{H\,max} - T_{KE})}{\Delta T_K} - 1\right]^2 - \frac{1}{\sin^2 \frac{\pi H}{2H'}}},$$

în care D_H este diametrul exterior al tubului de protecţie;
H — înălţimea efectivă a zonei active;
H' — înălţimea extrapolată a zonei active $\left(\frac{H}{H'} \approx 0{,}85\right)$;

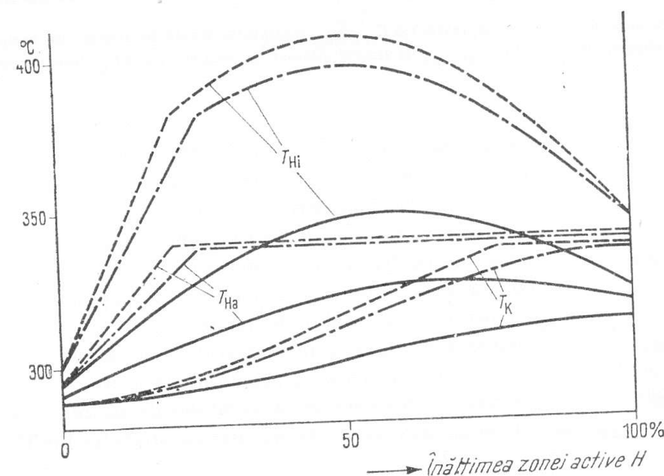


Fig. 5.62. Curbe de temperatură caracteristice într-un reactor cu apă sub presiune:

- - - - canal fierbinte cu sarcina de 120%;
-.-.-. canal fierbinte cu sarcina de 100%;
—— canal normal cu sarcina de 100%;
T_{Hi} temperatura suprafeţei interioare a protecţiei elementului combustibil;
T_{Ha} temperatura suprafeţei exterioare a protecţiei elementului combustibil;
T_K temperatura agentului de răcire.

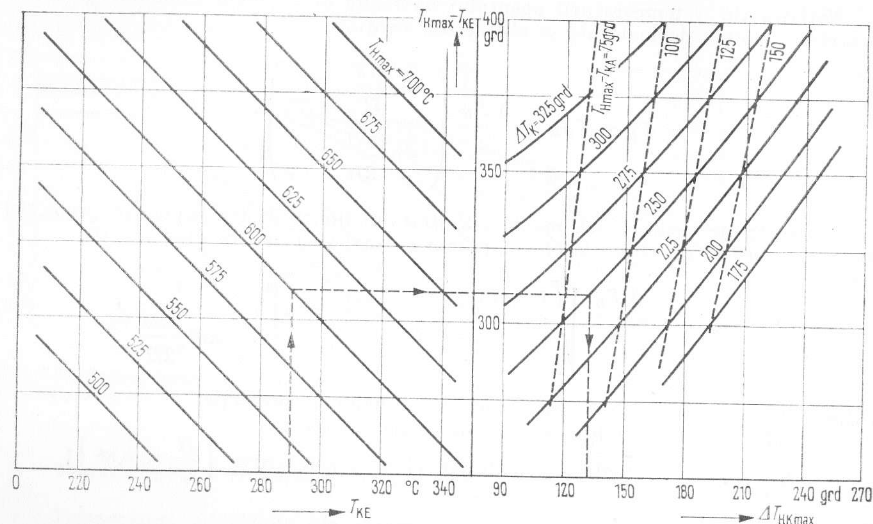


Fig. 5.63. Diferența maximă de temperatură ΔT_{HKmax} a stratului limită în funcție de temperatura maximă a învelișului de protecție $T_{H\,max}$ și timpul necesar de încălzire cu ΔT_K (reactor răcit cu gaz).

q_s	— puterea specifică a barei raportată la lungimea acesteia;
r	— distanța radială de la centrul barei de combustibil;
R	— raza barei de combustibil;
T_0	— temperatura combustibilului în centrul barei;
T_r, T_R	— temperatura barei de combustibil în punctul r sau R;
T_H	— temperatura suprafeței învelișului tubular de protecție;
T_K	— temperatura agentului de răcire;
T_{KE}	— temperatura de intrare a agentului de răcire;
T_{KA}	— temperatura de ieșire a agentului de ieșire;
ΔT_K	— creșterea de temperatură a agentului de răcire $= T_{KA} - T_{KE}$;
ΔT_{HKmax}	— diferența maximă de temperatură a stratului limită în canalul de răcire;
z	— coordonata axială a canalului de răcire (măsurată din centrul zonei active);
α	— coeficientul de schimb de căldură de la tubul de protecție la agentul de răcire;
λ	— conductivitatea termică a combustibilului.

Fluxul critic al suprafețelor de încălzire ale barelor de combustibil pentru reactoare răcite cu apă la tranziția de la fierberea nucleară la cea de fierbere peliculară (DNB = depărtarea de la fierberea nucleară după L. S. Tong) este:

$$q_{DNB} = \frac{1}{K}[2{,}022 - 0{,}0061\,p + (0{,}1722 - 0{,}0014\,p) \times e^{(18{,}177 - 0{,}0587 p)x}] \times$$

$$\times [3\,271 + (0{,}1484 - 1{,}596\;x + 0{,}1729\,x\,|x|) \times 6{,}465 \times 10^{-4}\,G] \times$$

$$\times (1{,}157 - 0{,}869\;x) \times (0{,}2664 + 0{,}8357\;e^{-0{,}124\,d_h}) +$$

$$+ [0{,}8258 + 0{,}00143\;(i'_K + i_{KE})].$$

Raportul DNB

$$S_F = \frac{q\;(z)}{q_{DNB}\;(z)}.$$

Semnificația și unitățile de măsură ale parametrilor utilizați (cifrele din paranteză reprezintă domeniul de valabilitate al formulei empirice) sînt:

$q\;(z)$	— fluxul local real, în W/cm²;
$q_{DNB}\;(z)$	— fluxul local critic, în W/cm²;
$K\;(z)$	— factor de corecție pentru distribuția neuniformă a debitului:
$p\;(z)$	— presiunea, în kgf/cm² (55—160 kgf/cm²);
$x\;(z)$	— titlul local al aburului (—0,15 .. + 0,15), $= \dfrac{r}{i_K - i'_K}$;
G	— densitatea debitului gravimetric, în kg/m² · s (680 — 6 800 kg/m² · s);
d_h	— diametrul hidraulic al canalului de răcire, în mm (5—18 mm);
$i_K\;(z)$	— entalpia locală, în kcal/kg;
$i'_K\;(z)$	— entalpia apei la presiunea de saturație $p\;(z)$, în kcal/kg;
i_{KE}	— entalpia la intrarea în canalul de răcire, în kcal/kg (> 220 kcal/kg);
$r\;(z)$	— căldura latentă, în kcal/kg.

Lungimea canalului de răcire: 250 — 3 700 mm.

Efectul condițiilor de temperatură din reactor asupra ciclului de abur

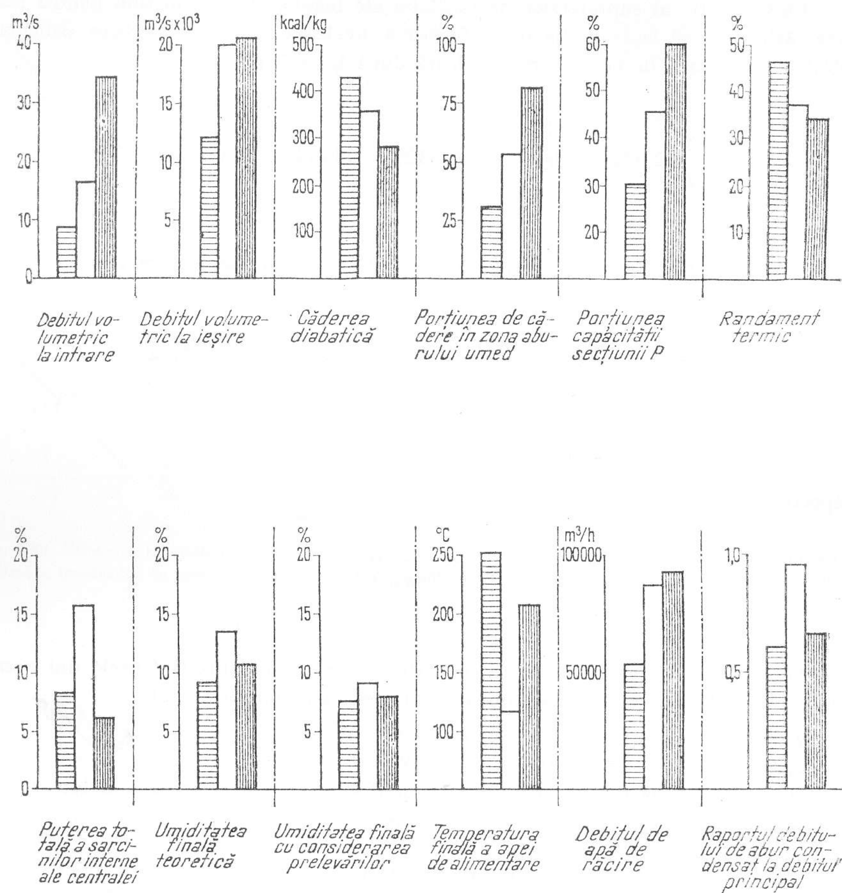


Fig. 5.64. Diferențele principale între diverse procese pentru o putere de 600 MW.

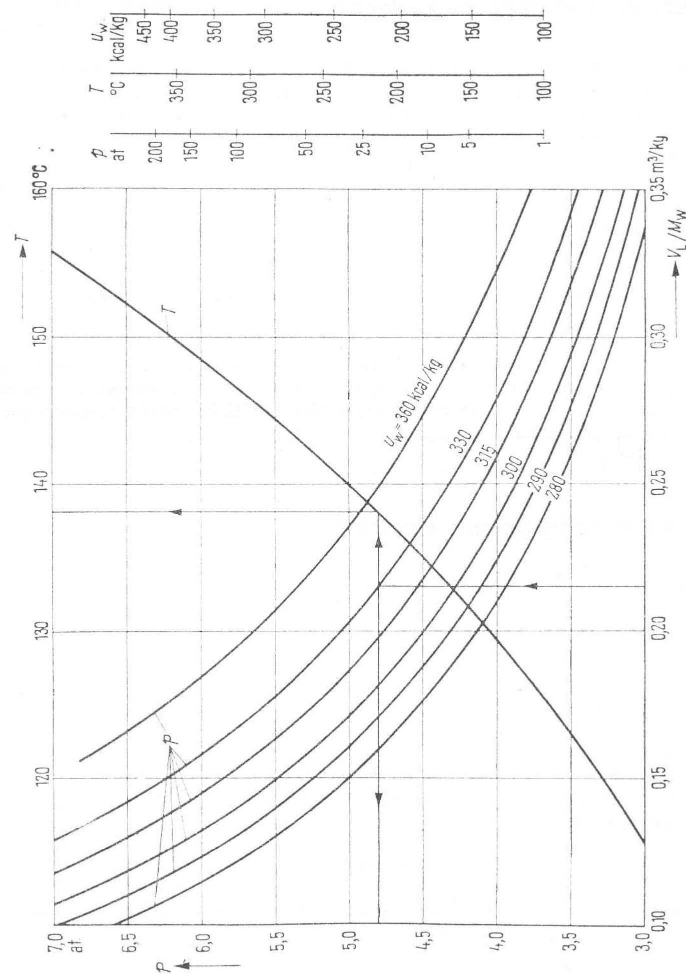


Fig. 5.65. Presiunea și temperatura în cazul ruperii unei conducte principale de agent de răcire la un reactor cu apă sub presiune (fără sistem de reducere a presiunii):

V_L – volumul liber în interiorul clădirii, în m³; M_W – cantitatea de apă pusă în libertate (funcție de conținutul vasului reactorului, dispozitivul de presurizare și sistemul circuitului de răcire a reactorului), în kg; U_W – energia internă a apei pusă în libertate, în kcal/kg; p – presiunea de egalizare, în at: T – temperatura de saturație corespunzătoare presiunii, în °C.

5.6. INSTALAŢII HIDROELECTRICE

5.6.1. Tipuri de instalaţii hidroelectrice

Centralele pe firul apei utilizează apa în mod continuu, avînd capacitate de acumulare mică; apa care nu este utilizată deversează peste baraj şi este pierdută. Centrala de forţă poate fi amplasată pe albia rîului sau de-a lungul lui, în care caz instalaţia este denumită centrală de tip canal de derivaţie.

Centralele cu acumulare în funcţie de capacitatea lor de acumulare sînt centrale cu acumulare săptămînală, sezonieră sau anuală. În perioadele cu cerere de sarcină redusă, apa poate fi acumulată şi utilizată cînd cererea este mare, aceasta asigurînd o exploatare elastică. Singura pierdere este constituită de debitul minim de apă care trebuie evacuat în aval cînd centrala este oprită. Avantaj: controlul acumulărilor de apă, în acest fel nivelul rîului devenind mai uniform.

Centralele cu pompare-acumulare reprezintă forma cea mai perfecţionată a centralei cu acumulare, dacă cursurile de apă nu alimentează pe cale naturală rezervoarele de acumulare; aceste centrale nu se clasifică ca un tip major. În prezent acestea constituie singura metodă economică de a acumula mari rezerve de energie electrică. Mai mult, ele reprezintă un procedeu util de furnizare a energiei în perioadele de vîrf chiar în ţări în care condiţiile topografice nu favorizează construcţia de centrale cu acumulări importante.

5.6.2. Maşini şi echipamente electrice

Puterea disponibilă a generatorului, este:

$$P_{gen} = \frac{1\,000\,QH}{102}\,\eta_t \cdot \eta_g \ [\text{kW}],$$

în care: Q este debitul de apă, în m³/s;
H — căderea netă, în m;
η_t — randamentul turbinei;
η_g — randamentul generatorului.

Ca un îndreptar aproximativ pentru instalaţii mai mici (cu $\eta_t = 0{,}85$ şi $\eta_g = 0{,}96$) se poate folosi următoarea relaţie:

$$P_{gen} = 8\,QH.$$

Dacă volumul util de apă K, în m³, este cunoscut (de exemplu capacitatea unui rezervor, debitul anual etc.) lucrul mecanic produs este:

$$A = \frac{1\,000\ KH}{3\,600 \times 102}\,\eta_t\,\eta_g \ [\text{kWh}],$$

Dacă $1000\,\eta_t\,\eta_g/102 = 8$, atunci $A = 0{,}0022\ KH$ [kWh], astfel încît pentru fiecare metru cub pot fi generate $0{,}0022\ H$ [kWh],

Maşini

Cele mai importante *tipuri de turbine* sînt:

Turbina Kaplan cu paletele rotorului şi statorului reglabile. *Turbina Francis* cu paletele statorului reglabile. *Turbina Pelton* cu unul sau mai multe ajutaje, cu sau fără deflector de jet.

Domeniul de aplicare este impus de Q şi H şi este arătat în fig. 5.66.

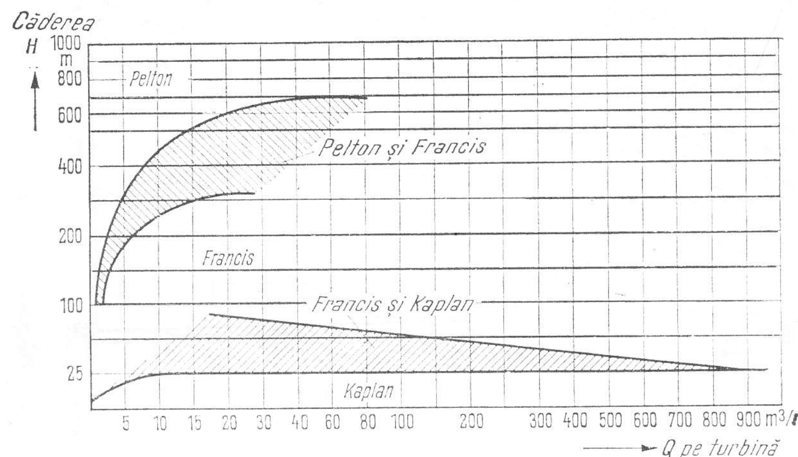


Fig. 5.66. Domeniul de aplicare a tipurilor de turbine Kaplan, Francis şi Pelton.

Alegerea precisă a turbinei este determinată în principal de rapiditatea specifică n_s, calculată din relaţia:

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H\sqrt[4]{H}}\ [\text{rot/min}]^{1)},$$

în care puterea P este exprimată în CP, iar turaţia turbinei n în rot/min. Aceasta înlesneşte stabilirea tipului de rotor pentru turbina care urmează să fie aleasă.

Cu unele toleranţe admise, mărimea turbinei Kaplan poate fi aleasă din fig. 5.67, iar mărimea turbinei Francis din fig. 5.68.

Curbele permit stabilirea turaţiei de regim maxim ca şi a diametrului aproximativ al rotorului D. Turaţia obţinută trebuie apoi redusă la cea mai apropiată turaţie de sincronism (v. generatoare). Această turaţie poate fi utilizată ca turaţie nominală pentru scopuri ulterioare. În multe cazuri, ea trebuie însă redusă încă mai mult, în parte pentru a se evita construcţia prea în adîncime a turbinei (fundaţii adînci, neafectate de apele de viitură) şi în parte pentru a se obţine randamente bune la sarcini scăzute.

¹) Presupusă pentru o turbină model cu căderea de 1 m şi dezvoltînd puterea de 1 CP.

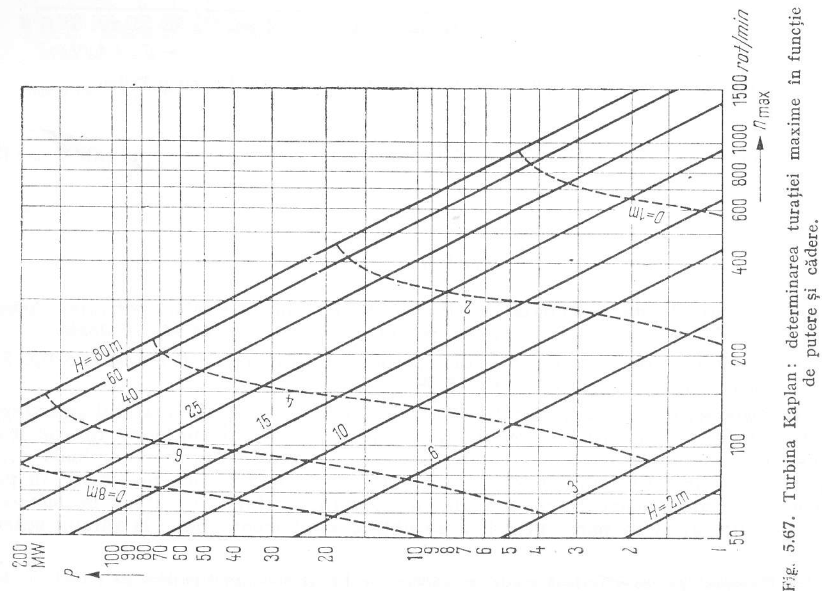


Fig. 5.67. Turbina Kaplan: determinarea turației maxime în funcție de putere și cădere.

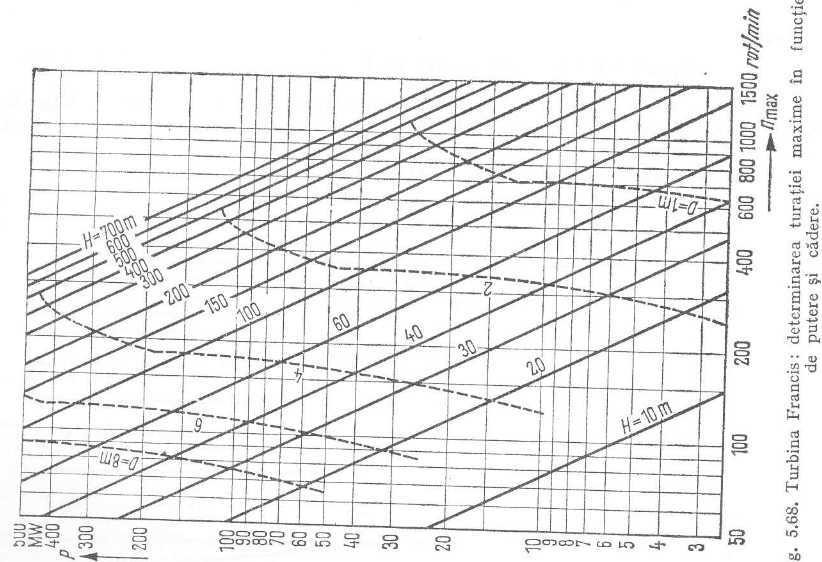


Fig. 5.68. Turbina Francis: determinarea turației maxime în funcție de putere și cădere.

Turația nominală n_N permite de asemenea determinarea aproximativă a unei alte mărimi, care are o influență considerabilă asupra proiectării generatorului.

Aceasta este *turația de ambalare* n_D. Raportul n_D/n_N pentru tipurile de turbine menționate sînt:

turbina Pelton $n_D/n_N \approx 1{,}8$;

turbina Francis $n_D/n_N \approx 1{,}8 - 2{,}4$;

turbina Kaplan $n_D/n_N \approx 2{,}5 - 3{,}5$.

Turbinele Kaplan și Francis funcționînd la o cădere disponibilă H mai scăzută au o valoare mai mare pentru n_D.

În plus față de cele de mai sus, există alte tipuri de turbine corespunzătoare unor condiții speciale.

Turbina bulb (fig. 5.69) a fost special construită pentru a folosi cantități de apă mari la căderi mici. Aceste mașini nu necesită o carcasă spirală masivă, astfel încît distanța dintre grupuri poate fi mai mică. Costurile construcțiilor pot fi reduse în mod corespunzător, curgerea aproape în linie dreaptă a debitului de apă conducînd și la o îmbunătățire a condițiilor hidraulice de funcționare (spor de randament). Axul turbinei Kaplan este sau orizontal sau ușor înclinat și este cuplat cu generatorul, astfel încît carcasa etanșă față de apă este complet imersată în apă.

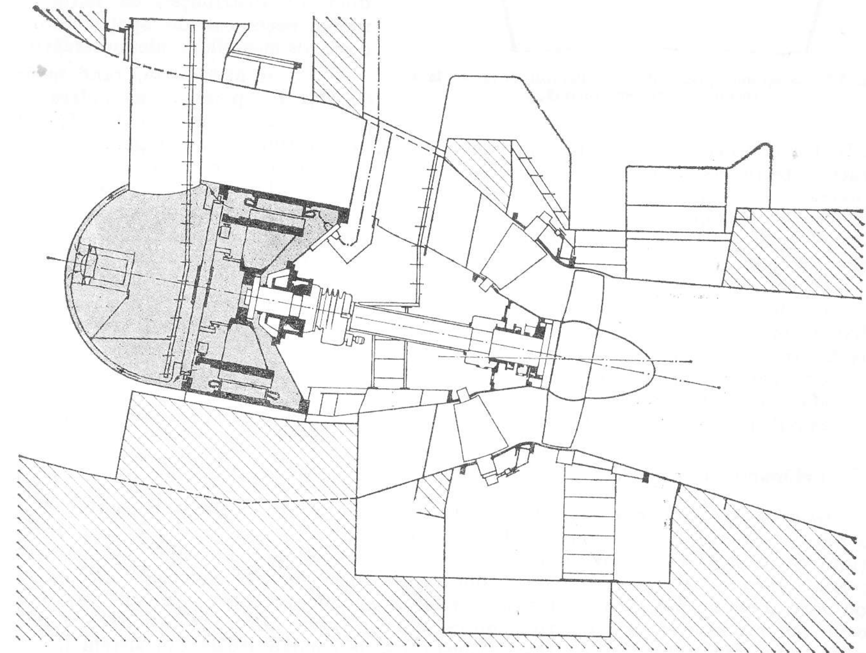


Fig. 5.69. Turbină bulb cuplată direct cu generatorul.

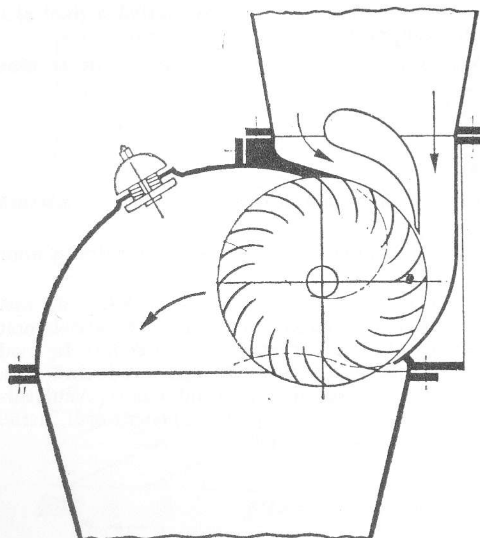


Fig. 5.70. Secţiunea prin rotor şi aparatul director la o turbină cu trecere directă.

Turbina cu trecere directă (fig. 5.70), cunoscută în mod diferit ca fiind de tipul Banki, Michell sau Ossberger, este în special potrivită pentru cazurile în care debitul de apă de alimentare prezintă fluctuaţii considerabile (P pînă la aproximativ 220 kW, cu $H = 1 \ldots 100$ m, iar $Q = 4\,000 \ldots 25$ l/s). În plus, pentru datele mici se folosesc proiecte economice speciale ale primelor tipuri de turbine mici.

Pompa-turbină reprezintă o formă specială de instalaţie hidraulică concepută pentru centrale cu pompare-acumulare, fiind utilizabilă atît ca turbină cît şi ca pompă, pentru valori ale lui $H \leqslant 400$ m (într-o singură treaptă). Deoarece această soluţie economiseşte o unitate hidraulică completă cu vană de control şi conducte de distribuţie, ea reduce nu numai necesarul de spaţiu, dar şi costurile maşinilor şi ale construcţiilor.

Pe de altă parte, randamentul ciclului de pompare-acumulare este puţin mai scăzut (cu 2—4%) decît în cazul prevederii separate a unei pompe şi a unei turbine. La pompare, sensul de rotaţie este invers faţă de cel de la funcţionarea ca turbină. Prin urmare, cînd funcţionarea se schimbă, turaţia trebuie să treacă prin zero. Mai mult, deoarece nu se dispune de o turbină care să antreneze grupul pînă la turaţia de pompare, trebuie să se utilizeze în acest scop, maşini hidraulice sau electrice (motor cu pornire la tensiune redusă cu pornire de frecvenţă, motor de lansare sau turbină de pornire).

Maşinile includ de asemenea, următoarele părţi componente principale:

Elemente de control, ca de exemplu vane amonte şi aval pentru închiderea intrării şi conductelor de aspiraţie în vederea reviziilor sau, dacă se utilizează o conductă forţată, o vană fluture, inel sau sferică.

Grătarul de intrare, inclusiv maşina pentru curăţarea grătarelor.

Macara rulantă pentru montajul pieselor grele.

Stavilele deversorului: de obicei segmenţi, mici stavile de golire sau rotative.

Echipamentul electric

Generatoare. Singurele maşini utilizate pentru instalaţii medii şi mari sînt de tip sincron, deşi centralele mai mici pot fi echipate cu maşini asincrone. Totuşi, trebuie reţinut că ultimele au dezavantaje care depăşesc avantajul costurilor lor mai scăzute. Pentru a furniza energie, ele trebuie conectate la un sistem în funcţiune, deoarece în mod normal ele nu pot furniza energie în mod independent pentru o regiune. Mai mult, ele nu pot produce energie reactivă, necesitînd ele însele acest fel de putere. Această putere trebuie fie extrasă din reţea, fie furnizată de condensatoare din sistem (asemănător cu puterea reactivă cerută de consumatori ca motoarele electrice).

T u r a ţ i a g e n e r a t o a r e l o r sincrone poate fi calculată cu relaţia:

$$n_0 = 60\,\frac{f}{p}$$

în care f este frecvenţa, în Hz;
p — numărul de perechi de poli.

Valorile turaţiei determinate cu ajutorul acestei relaţii sînt folosite pentru a se obţine turaţiile turbinei conform diagramelor din fig. 5.67 şi 5.68.

Cele mai importante *tipuri de generatoare hidroelectrice* sînt enumerate în tabelul 5.32. Poziţia verticală sau orizontală a arborelui principal este decisă de obicei de tipul turbinei sau de amplasarea conductelor şi de condiţiile instalaţiei. Alegerea dispoziţiei

Tabelul 5.32. **Tipuri de hidrogeneratoare**

Proiect tip W_{21} [1])	*Generator:* 1 lagăr de ghidare, 1 lagăr axial, 1 arbore cu flanşă *Turbină:* 1 lagăr de ghidare, 1 arbore cu flanşă	Proiect tip W_{42} [1])	*Generator:* 2 lagăre de ghidare, 1 lagăr axial, 1 arbore cu flanşă *Turbină:* 1 lagăr de ghidare, 1 arbore cu flanşă
Proiect tip W_3	*Generator:* 2 lagăre de ghidare, 1 arbore cu flanşă *Turbină:* 1 lagăr de ghidare, 1 lagăr canelat de sprijin, 1 arbore cu flanşă	Proiect tip W_6	*Generator* fără lagăr, fără arbore *Turbină:* 2 lagăre de ghidare, 1 lagăr axial, 1 arbore generator
Proiect tip W_{41} [1])	*Generator:* 2 lagăre cu ghidare, 1 lagăr axial, 1 arbore cu flanşă *Turbină:* 1 lagăr de ghidare, 1 arbore cu flanşă	Proiect tip W_8	*Generator:* 1 lagăr de ghidare, 1 lagăr axial, 1 arbore cu flanşă *Turbină:* 1 lagăr de ghidare, 1 arbore cu flanşă

Tabelul 5.32 (continuare)

Proiect tip D_2	*Generator:* 1 lagăr cu picior; 1 arbore cu flanşă; Placă de bază comună pentru carcasă şi lagăre	Proiect tip D_{11}	*Generator:* 2 lagăre cu picior; 1 arbore cu dilatare liberă; 2 plăci de sprijin ale carcasei; 2 plăci de sprijin ale lagărului
Proiect tip D_5	*Generator:* 2 lagăre cu picior; 1 arbore cu dilatare liberă; Placă de bază comună pentru carcasă şi lagăre	Proiect tip D_{12}	*Generator:* 2 lagăre cu picior; 1 arbore cu flanşă; 2 plăci de sprijin ale lagărului; 2 plăci de sprijin ale lagărului
Proiect tip D_6	*Generator:* 2 lagăre cu picior; 1 arbore cu flanşă; Placă de bază comună pentru lagăre cu picior		

[1]) A doua cifră indicativă înseamnă: 1 lagăr axial superior, 2 lagăre axiale inferioare

verticale este adesea dictată de tipul generatorului. Diagrama din fig. 5.66 arată limitele aproximative de utilizare a diferitelor tipuri de hidrogeneratoare. *Efectul de volant* este important în scopuri de control, respectiv pentru limitarea supraturaţiei, atunci cînd maşina este oprită sub plină sarcină. Deoarece rotorul turbinei contribuie în mică măsură la aceasta, întregul efect de volant urmează a fi produs de rotorul generatorului. Aceasta se calculează din greutatea rotorului G şi din diametrul de giraţie D.

Momentul de inerţie = GD^2 [kgfm²].

Momentul de inerţie este, de asemenea, egal cu WR^2, exprimat în lbf · ft² (livre forţă × picior pătrat), în care W este greutatea în livre forţă şi R raza de giraţie, în picioare, astfel încît:

$$1\ GD^2\ [\text{kgfm}^2] = \frac{1}{5{,}94}\ WR^2\ [\text{lbf} \cdot \text{ft}^2]\ \text{(v. pag. 30)}$$

T u r a ţ i a d e a m b a l a r e n_D este un alt parametru important pentru proiectarea generatorului. Valorile raportului n_D/n_N pentru cele mai importante tipuri de turbine au fost menţionate anterior.

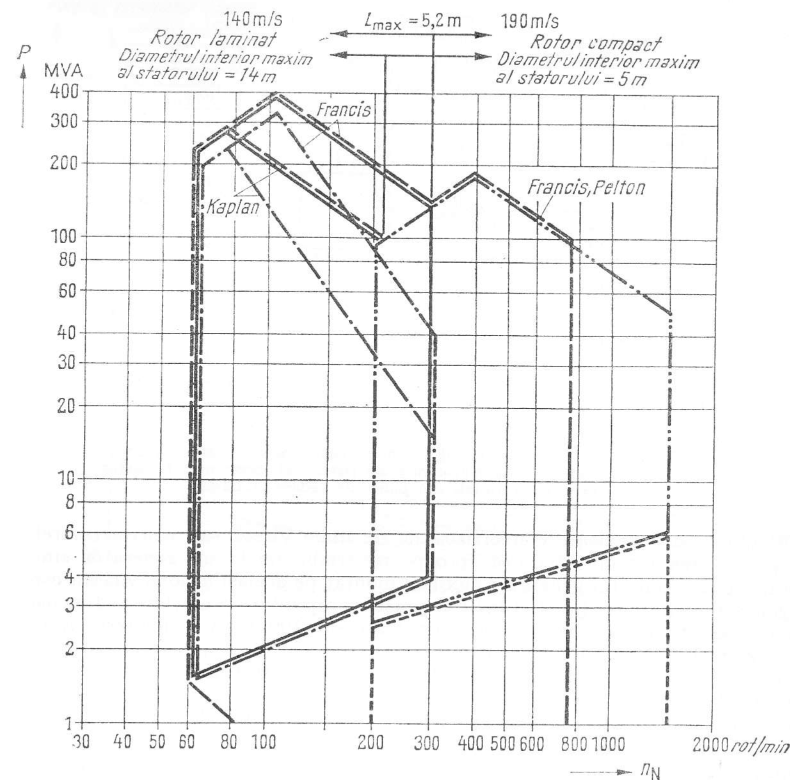


Fig. 5.71. Generatoare hidroelectrice (pentru puteri ≥ 1 MVA): domeniul normal de aplicaţie pentru diferite proiecte.

În mod normal părţile în rotaţie nu sînt solicitate pînă la punctul de curgere la turaţia n_D (de exemplu numai pînă la 2/3 din valoarea punctului de curgere). În consecinţă, eforturile în metal la turaţia nominală sînt foarte scăzute. Ar fi în afara scopului acestui articol să se ocupe de toate criteriile pentru generatoare, astfel încît acestea au fost rezumate în tabelul 5.32.

Amplasarea excitatoarei

Generatoarele cu o turaţie de peste 200 rot/min sînt în mod normal echipate cu o excitatoare principală montată pe generator sau cu o excitatoare auxiliară de curent continuu; la turaţii sub 200 rot/min se preferă alte soluţii pentru excitaţie, aceasta deoarece maşinile de curent continuu sînt prea voluminoase şi reacţia lor în scopuri de control este prea înceată.

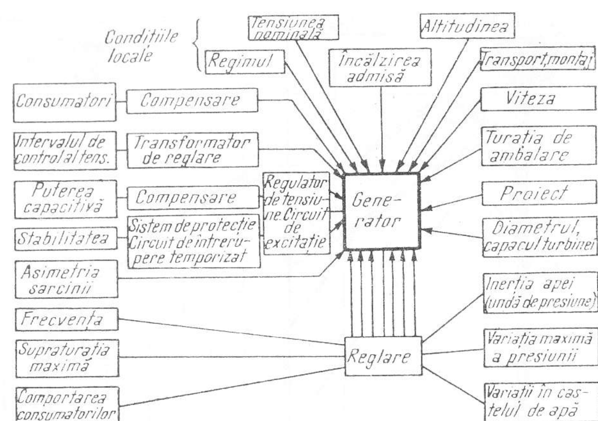


Fig. 5.72. Criterii de proiectare pentru hidrogeneratoarele electrice. Partea din stînga: necesitățile consumatorilor și ale sistemului interconectat; partea din dreapta: cerințele din punct de vedere hidraulic.

De obicei sînt utilizate convertizoarele de mare viteză sau convertizoarele tiristoare, alimentarea lor obținîndu-se aproape invariabil de la un generator sincron cu autoexcitație, așa-numitul generator auxiliar montat pe același arbore. Acesta este montat în generatorul principal, astfel încît el practic nu produce o creștere a dimensiunilor. În afară de aceste dispozitive pentru generatoare sub 100 MVA se folosesc circuite statice de excitație, constînd din transformatoare, bobine de reactanță, redresoare sau tiristoare; acestea elimină toate piesele în mișcare și întreținerea respectivă. În plus ele răspund la variațiile de sarcină mai repede decît excitatoarele rotative cu regulatoare de tensiune. Astfel de circuite de excitație sînt patentate sub denumirea de TRANSIPOL sau THYRIPART.

Sisteme auxiliare. Serviciile interne ale centralelor hidroelectrice necesită putere relativ redusă. Acestea pot fi grupate în două părți: (1) servicii interne necesare în special pentru exploatarea mașinilor (pompe pentru uleiul din circuitul de comandă, uleiul de control, apă de răcire, ulei de transformator și stația de aer comprimat) și (2) servicii interne ale centralei în general (ventilație, încălzire, aer condiționat, pompe de drenare, macarale, mașini de curățat grătarele de intrare, mecanismele deversorului).

Primul grup de servicii interne este afectat de cădere: la putere constantă a mașinii, el crește cu cantitatea de apă. Mărimea lui este desigur determinată de puterea centralei electrice. La proiectarea alimentării serviciilor interne, grupul (1) trebuie multiplicat cu un factor de simultaneitate de 0,8–0,9.

Al doilea grup de servicii interne este determinat în principal de „confortul" centralei (ventilație, încălzire, aer condiționat, iluminat) și este numai în mică măsură afectat de puterea centralei. La proiectarea acestei părți trebuie să se adopte un factor de simultaneitate de 0,25–0,3.

Puterea totală a serviciilor interne este reprezentată în fig. 5.73 printr-o curbă plină, iar partea întîi printr-o curbă întreruptă; partea a doua se obține determinîndu-se diferența între aceste două curbe, această parte fiind în mod obișnuit cea mai mare

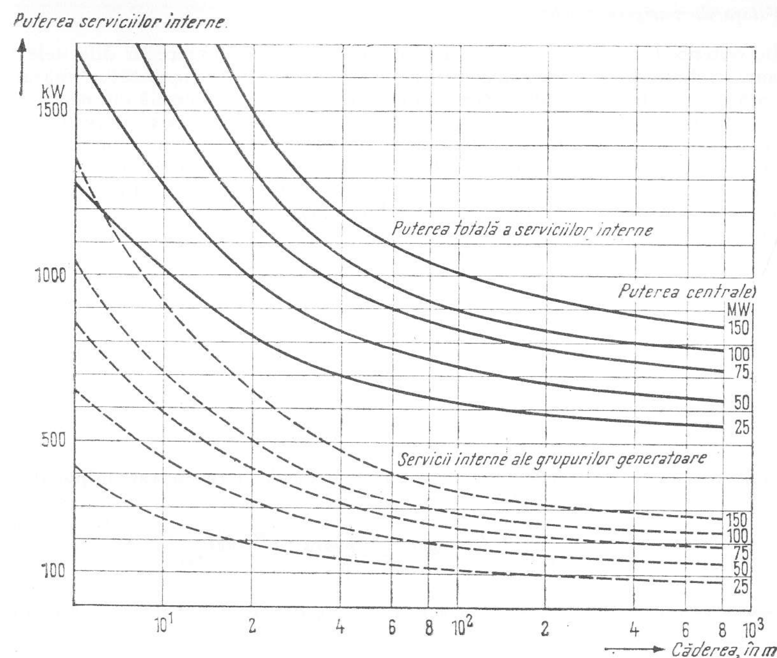


Fig. 5.73. Puterea pentru alimentarea serviciilor interne.

Alimentarea serviciilor interne este asigurată cel puțin prin două surse independente: una formată din unul dintre generatoarele instalate în centrală, cealaltă din conectarea la un sistem sigur sau la altă centrală electrică. Alimentarea serviciilor interne devine în întregime independentă dacă un grup generator Diesel este instalat în centrală, mărimea acestuia fiind în mod uzual determinată de serviciile proprii ale unui grup generator și de iluminatul de siguranță.

5.6.3. Lucrări pregătitoare la locul de amplasare

Dacă criteriile pentru calculul puterii disponibile nu sînt cunoscute, cum este de obicei cazul centralelor hidroelectrice mici, trebuie determinate debitul de apă Q și căderea H, folosindu-se pentru aceasta cîteva procedee.

Debitul de apă

Debitul de apă Q poate fi, de exemplu, calculat din viteza de scurgere și secțiunea transversală de scurgere.

Viteza de scurgere a apei

În vederea limitării erorii la valori mici, viteza de scurgere în diferitele puncte de măsură trebuie să difere cît mai puţin posibil. În mod corespunzător, măsurătorile se execută cel mai bine într-un sector drept cu secţiunea transversală cît mai constantă posibil. Lungimea de măsurare este jalonată în intervale de aproximativ 30 m, aruncîndu-se în apă o sticlă astupată într-un punct reper din partea amonte. Timpul necesar pentru a atinge al doilea reper este înregistrat şi procedeul repetat de mai multe ori pentru a se obţine o cifră medie. Această cifră medie are o valoare mai redusă (cu circa 20%) în straturile limită datorită frecării cu ţărmul şi patul albiei. Presupunîndu-se că se obţine 1 m/s va rezulta o viteză:

$$v_{medie} = 1 \text{ m/s} \times 0{,}8 = 0{,}8 \text{ m/s}.$$

Secţiunea transversală de curgere

Lăţimea totală a cursului de apă este împărţită în mai multe secţiuni de la A_1 la A_n, fiecare de aceeaşi lăţime (în m), adîncimea apei fiind măsurată în mijlocul fiecărei secţiuni şi notată cu T_1 pînă la T_n (în m). Aria secţiunii transversale este atunci:

$$F = A_1T_1 + A_2T_2 + \ldots + A_nT_n \text{ [m}^2\text{]}.$$

Dacă este posibil, această măsurătoare trebuie efectuată la începutul, mijlocul şi sfîrşitul sectorului de măsură, astfel că:

$$F_{medie} = \frac{F_{inceput} + F_{mediu} + F_{final}}{3}.$$

Exemplu: Lăţimea unui curs de apă este 10 m, se aleg cinci secţiuni A fiecare de 2 m, adîncimile fiind:

$$T_1 = 0{,}4;\ T_2 = 1{,}2 \text{ m};\ T_3 = 2{,}0 \text{ m};\ T_4 = 0{,}7 \text{ m};\ T_5 = 0{,}2 \text{ m};$$

$$F = (2 \times 0{,}4 + 2 \times 1{,}2 + 2 \times 2{,}0 + 2 \times 0{,}7 + 2 \times 0{,}2) \text{ m}^2 = 9{,}0 \text{ m}^2.$$

Fie celelalte două secţiuni de 8,6 şi 9,1 m².

$$F_{medie} = \frac{9{,}0 + 8{,}6 + 9{,}1}{3} = 8{,}9 \text{ m}^2.$$

Debitul de apă:

$$Q = V_{medie} \times F_{medie};$$

înlocuindu-se valorile:

$$Q = 0{,}8 \text{ m/s} \times 8{,}9 \text{ m}^2 = 7{,}12 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Căderea brută

Dacă nu se dispune de instrumente de măsură, căderea brută poate fi determinată cu ajutorul unei bare de lemn rigide, drepte cu lungimea unei nivele de aproximativ 5 m, şi cîtorva jaloane de lemn.

După cum se arată în fig. 5.74, bara de lemn se aşază pe jalonul *1*, dispusă la nivel, măsurîndu-se apoi distanţa verticală h la jalonul *2*. Acest procedeu se repetă pînă

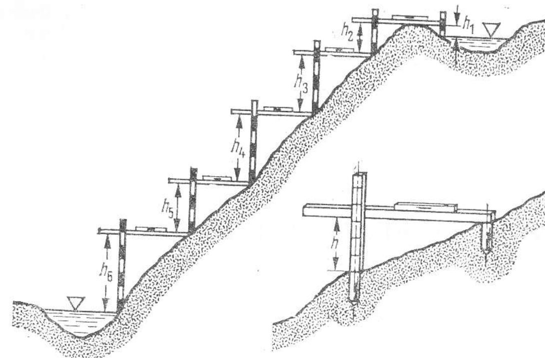


Fig. 5.74. Determinarea căderii totale.

cînd se măsoară toată distanţa dintre extremităţile amonte şi aval. Căderea totală brută este astfel suma tuturor căderilor parţiale h.

Deoarece h_1 este negativ, se obţine:

$$H_{brut} = -h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6.$$

Dacă H_{brut} se determină ca fiind de 5 m, puterea disponibilă poate fi determinată aproximativ după cum urmează:

$$P_{gen} = 8\ QH = (8 \times 7{,}12 \times 5) \text{ kW} \approx 285 \text{ kW}.$$

Întrucît Q şi H sînt supuse variaţiilor sezoniere nu este suficient să se lucreze cu un singur rînd de date; este recomandabil să se cunoască valorile maxime, medii şi minime ale debitului de apă şi căderile aferente. Dacă apa disponibilă este folosită numai parţial, este suficient să se calculeze debitul maxim pentru care urmează să se proiecteze turbina şi valorile pentru H_{min}, H_{max} şi H_n.

6. PROBLEME GENERALE ALE MAŞINILOR ELECTRICE

6.1. TIPURI CONSTRUCTIVE

Maşinile electrice se realizează în diferite tipuri constructive, standardizate prin STAS 3998-53. Tipurile în care pot fi executate maşinile electrice sînt împărţite în nouă grupe, indicate în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1. **Grupele tipurilor constructive ale maşinilor electrice**

Grupele tipurilor constructive ale maşinilor electrice rotative	Simbolurile grupelor
Maşini cu axa orizontală fără lagăre	L
Maşini cu axa orizontală şi lagăre în scuturi	S
Maşini cu axa orizontală, cu lagăre picior separate	SP
Maşini cu axa orizontală şi cu lagăre picior	P
Maşini cu axa orizontală şi fixare cu flanşă	F
Maşini cu axa verticală	V
Maşini cu axa verticală, tip hidrogenerator	HV
Maşini cu axa verticală şi fixare prin flanşă şi inel	VF
Agregate cu două maşini electrice	A

6.2. PROTECŢIA MAŞINILOR ELECTRICE CONTRA ATINGERILOR ŞI CONTRA APEI

Diversitatea condiţiilor legate de mediu a determinat stabilirea unor tipuri constructive cu protecţii bine definite, urmînd ca fiecare beneficiar să solicite, pentru maşina comandată, în funcţie de locul unde urmează să o monteze, o protecţie din cadrul celor adoptate ca protecţii tip. Aceste tipuri de protecţii sînt standardizate prin STAS 625-63, iar terminologia şi simbolizarea lor prin STAS 5325-62.

Stabilirea tipurilor normale de protecţie are la bază:

— protecţia contra atingerilor şi contra pătrunderii corpurilor străine;

— protecţia contra pătrunderii lichidelor.

Tipurile normale de protecţie sînt simbolizate prin literele IP urmate de două cifre, dintre care prima simbolizează tipul de protecţie contra atingerilor şi contra

pătrunderii corpurilor străine, iar cea de a doua caracterizează tipul de protecţie contra pătrunderii lichidelor.

Sînt standardizate şase grade normale de protecţie contra atingerilor şi contra pătrunderii corpurilor străine şi opt grade normale de protecţie contra pătrunderii lichidelor.

Protecţia contra atingerii şi contra pătrunderii corpurilor străine este simbolizată după cum urmează:

Simbolul 0 indică maşini fără protecţie; prin urmare sînt posibile atingeri ale părţilor aflate sub tensiune şi ale părţilor în mişcare din interiorul maşinii, precum şi pătrunderi ale corpurilor străine. Această execuţie nu se recomandă decît în cazuri cu totul speciale, dat fiind pericolul pe care-l prezintă din punctul de vedere al protecţiei muncii şi al deteriorării în urma pătrunderii corpurilor străine.

Simbolul 1 indică maşini cu protecţie împotriva atingerii întîmplătoare cu o mare suprafaţă a corpului omenesc, de exemplu mîna, însă la care este posibilă atingerea voită a părţilor interioare sub tensiune sau în mişcare. Carcasa sau învelişurile de protecţie ale utilajului pot avea deschideri de 50 mm diametru sau lărgime. Această protecţie este folosită mai mult la maşinile mari şi la cele destinate a fi instalate în locuri speciale, unde are acces numai personal specializat.

Simbolul 2 este pentru maşini cu protecţie împotriva atingerii cu degetele şi a pătrunderii corpurilor străine solide cu dimensiuni peste 12,5 mm, ele putînd avea deschideri de 12,5 mm diametru sau lărgime. Această execuţie este cea mai indicată pentru maşini care lucrează în încăperi, întrucît asigurînd îngrădiri suficiente în ceea ce priveşte posibilitatea de pătrundere a corpurilor străine şi de atingere a părţilor interioare, permite autoventilarea interioară a maşinilor, care constituie factorul hotărîtor în reducerea dimensiunilor acestora.

Simbolul 3 este pentru maşini cu protecţie împotriva atingerii cu unelte sau a pătrunderii corpurilor străine cu dimensiuni peste 2,5 mm, ele putînd avea deschideri de 2,5 mm diametru sau lungime.

Această protecţie permite autoventilarea maşinilor, asigurînd o protecţie mai mare împotriva atingerii şi a pătrunderii corpurilor străine.

Simbolul 4 este pentru maşini cu protecţie împotriva atingerii cu unelte şi a pătrunderii corpurilor străine cu dimensiuni peste 1 mm. Această protecţie este suficientă, în general, pentru maşini destinate să funcţioneze în locuri descoperite, cu procent redus de praf. Carcasa sau învelişul maşinii nu poate avea deschideri, admiţîndu-se interstiţii de maximum 1 mm la îmbinări, la trecerea arborilor şi intrarea cablurilor în cutia de borne.

Simbolul 5 este pentru maşini cu protecţie contra atingerii cu orice fel de mijloace şi protecţie parţială împotriva pătrunderii prafului, prin folosirea de garnituri, labirinţi etc. Deşi pătrunderea prafului nu este complet impiedicată, protecţia este totuşi suficientă pentru a permite montarea maşinilor în locuri cu praf mult, de exemplu în fabricile de ciment.

Simbolul 6 este pentru maşini la care pătrunderea prafului este complet împiedicată. Este o protecţie greu de realizat şi nu este necesară decît în cazuri speciale.

Protecţia contra pătrunderii lichidelor se simbolizează după cum urmează:

Simbolul 0 este pentru maşini fără protecţie. Se adoptă pentru maşini destinate a fi montate în încăperi închise, în care nu există pericolul ca aburul să condenseze pe plafon şi să cadă apoi pe maşină sub formă de picături.

Simbolul 1 este pentru maşini cu protecţie contra picăturilor de apă condensată, fiind prevăzute cu acoperiş la partea superioară.

Simbolul 2 este pentru maşini cu protecţie contra picăturilor de lichide căzînd pe verticală. Este o protecţie care permite adoptarea unei soluţii constructive care să asigure o puternică ventilaţie a maşinii, întîlnită la maşinile de curent continuu de mare intensitate, la care problema răcirii colectorului este esenţială.

Simbolul 3 este pentru maşini la care protecţia nu permite pătrunderea lichidelor sub formă de stropi căzînd pe direcţii înclinate pînă la 45° faţă de verticală. Această protecţie se recomandă şi este foarte răspîndită, deoarece este cea mai severă protecţie care permite totuşi construcţia maşinilor autoventilate cu circulaţie prin interior a aerului, ceea ce conduce aşa cum s-a arătat, la gabarite reduse ale maşinilor electrice.

Utilizarea maşinilor în locuri complet neferite de precipitaţiile atmosferice impune însă multă prudenţă, întrucît acestea pot cădea şi pe direcţii a căror înclinaţie este mai mare de 45° faţă de verticală.

Simbolul 4 este pentru maşini cu protecţie contra stropilor cu lichide din orice direcţie. Maşinile cu această protecţie pot fi montate în principiu în locuri expuse precipitaţiilor atmosferice. Se va evita însă montarea lor în regiuni caracterizate prin ploi torenţiale frecvente, dat fiind că protecţia este asigurată numai contra stropilor de apă.

Simbolul 5 este pentru maşini cu protecţie contra jeturilor de apă aruncate de către un furtun. Maşina poate avea deschideri, care sînt însă prevăzute cu acoperiri speciale.

Simbolul 6 este pentru maşini cu protecţie împotriva pătrunderii în interior a apei provenite din valuri, potrivită condiţiilor de pe puntea navelor.

Simbolul 7 este pentru maşini cu protecţie împotriva cufundării în lichid. Protecţia nu permite intrarea apei, care ar putea împiedica buna funcţionare a utilajului, după menţinerea lui un anumit timp în apă.

Simbolul 8 este pentru maşini cu protecţie împotriva cufundării în apă sub presiune. Această protecţie nu permite intrarea apei în maşină în cursul cufundării la o anumită presiune şi într-un anumit timp. Maşinile electrice care prin construcţia lor şi prin izolaţia folosită sînt destinate a funcţiona în apă şi la care apa pătrunde normal în interior în timpul funcţionării (de exemplu unele motoare pentru pompe submersibile) se consideră din punctul de vedere al protecţiei egale cu gradul de protecţie 8.

Între protecţia contra atingerii şi pătrunderii corpurilor străine şi cea contra pătrunderii apei există o corelaţie indirectă, neputînd fi concepută, de exemplu, protecţia 4 contra atingerii şi protecţia 1 contra pătrunderii apei. De aceea, STAS 625-63 stabileşte protecţiile indicate mai jos, celelalte tipuri putînd fi solicitate numai în cazuri speciale. Protecţiile stabilite prin acest standard sînt: IP 00, IP 11, IP 12, IP 13, IP 22, IP 23, IP 33, IP 44, IP 54, IP 55, IP 66, IP 67.

6.3. LIMITELE TERMICE ADMISIBILE ALE MATERIALELOR ELECTROIZOLANTE FOLOSITE ÎN CONSTRUCŢIA MAŞINILOR ŞI TRANSFORMATOARELOR ELECTRICE

Temperatura limită la care poate funcţiona un material electroizolant este precizată în STAS 6247-60, standard care corespunde integral cu recomandările C. E. I., Publicaţia 85. Aceste limite de temperatură — menţionate în tabelul 6.2 — sînt determinate de stabilitatea termică a materialelor respective.

Tabelul 6.2. **Caracteristicile termice ale materialelor electroizolante**

Simbolul clasei de izolaţie	Temperatura care caracterizează stabilitatea termică a materialelor respective °C	Denumirea materialelor care corespund clasei de izolaţie respective
Y	90	Izolaţii compuse din bumbac, hîrtie sau mătase fără a fi impregnate sau introduse în lichide electroizolante.
A	105	Izolaţii compuse din bumbac, mătase sau hîrtie impregnate sau introduse în lichide electroizolante.
E	120	Unele pelicule organice sintetice precum şi diverse materiale ce pot funcţiona stabil la această temperatură.
B	130	Materiale pe bază de mică, azbest, fibre de sticlă cu lianţi şi compounduri de impregnare corespunzătoare.
F	155	Materiale pe bază de mică, azbest, fibre de sticlă cu lianţi şi compounduri de impregnare corespunzătoare.
H	180	Materiale pe bază de mică, azbest şi fibre de sticlă cu lianţi şi compounduri silico-organice (elastomeri silico-organici).
C	peste 180	Materiale pe bază de mică, cuarţ, porţelan, sticlă cu sau fără lianţi anorganici etc. Temperatura limită de utilizare este dictată de caracteristicile lor fizice, chimice şi electrice.

Prin *stabilitate termică* se înţelege capacitatea unui material de a-şi îndeplini funcţia sub acţiunea temperaturii de serviciu un timp comparabil cu cel calculat pentru durata normală de serviciu a utilajului electric în care se foloseşte.

În acest standard se presupune că materialele izolante sînt folosite în aer. În lipsa oxigenului se pot admite temperaturi mai mari pentru unele materiale la care stabilitatea termică este condiţionată de acest fapt.

În funcţie de clasa materialelor electroizolante folosite s-au stabilit limitele de încălzire pentru bobinajele maşinilor electrice şi pentru celelalte elemente ale acestora.

Aceste limite de încălzire s-au fixat în ipoteza că temperatura fluidului de răcire nu depăşeşte 40°C.

În tabelul 6.3 este cuprinsă o situaţie rezumativă a limitelor încălzirii care satisface necesităţile legate de construcţia maşinilor electrice din ţara noastră.

Tabelul 6.3. **Limitele de încălzire ale maşinilor electrice**

Partea componentă a maşinii	Izolaţii clasa					Metoda de determinare a încălzirii
	A	E	B	F	H	
Înfăşurările maşinilor de curent continuu şi alternativ	60	75	80	100	125	Variaţia rezistenţei
Miezurile de fier şi alte părţi în contact cu înfăşurările	60	75	80	100	125	Termometrul
Colectoare şi inele colectoare	60	70	80	90	100	Termometrul
Lagăre	45	45	45	45	45	Termometrul

Temperaturile admise pentru înfăşurările maşinilor electrice sînt mai mici decît cele corespunzătoare materialelor folosite pentru izolarea acestor înfăşurări. Aceasta se explică prin faptul că metodele de măsurare a încălzirilor determină valoarea medie a încălzirii înfăşurărilor. În realitate există însă locuri în care temperatura înfăşurării este mai ridicată faţă de această valoare medie. Deoarece nici în aceste locuri nu trebuie depăşite limitele prescrise pentru materialele electroizolante, limitele admise pentru înfăşurările maşinilor electrice sînt mai scăzute.

Diferenţele între limitele pe care le pot avea temperaturile înfăşurărilor şi temperaturile la care pot funcţiona materialele sînt următoarele:

clasa A :	5°C;	clasa F:	15°C;
clasa B :	5°C;	clasa H:	15°C.
clasa E :	10°C;		

Dacă la locul de exploatare a maşinii, valoarea maximă a temperaturii de intrare a agentului gazos de răcire depăşeşte 40°C, limitele de încălzire specificate trebuie reduse în consecinţă.

6.4. TRANSFERUL DE CĂLDURĂ

Căldura poate fi transferată de la un corp cu temperatură mai ridicată la un cu temperatură mai scăzută în trei moduri:

— prin *conducţie* în materiale solide, lichide sau gazoase (conducţia de căldură);
— prin *convecţie* în corpuri lichide sau gazoase (prin mişcarea moleculară);
— prin *radiaţii electromagnetice*, care sînt independente de existenţa unui mediu material pentru transferul căldurii (radiaţia de căldură).

Conducţia de căldură

Fluxul de căldură q este egal cu cantitatea de căldură care trece într-o secundă printr-o secţiune de 1 cm², fluxul fiind îndreptat de la locul de temperatură mai mare la locul de temperatură mai mică. Acest flux de căldură se calculează cu formula:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} \theta,$$

în care: λ este coeficientul de conductivitate termică, în cal/cm·s·grd;
grad θ — gradientul de temperatură, în grd/cm.

Pentru regimul staţionar ($\partial\theta/\partial t = 0$), care intervine în multe cazuri practice cantitatea de căldură transmisă se poate calcula foarte simplu cu formula:

$$\frac{Q}{tA} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta}\lambda,$$

în care: Q este cantitatea de căldură transmisă, în cal;
t — timpul, în s;
A — aria secţiunii, în cm²;
$\theta_1 - \theta_2$ — diferenţa de temperatură, în grd;
δ — distanţa între suprafeţele care se găsesc la temperatura θ_1, respectiv θ_2, în cm;
λ — coeficientul de conductivitate termică, în cal/cm·s·grd.

Pe baza principiului conservării energiei şi legii fluxului termic pentru un proces termic care variază în timp se poate scrie următoarea ecuaţie a conductivităţii termice:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2}\right) = a \operatorname{div} \operatorname{grad} \theta,$$

unde a este coeficientul de difuzie termică ce depinde de material (v. tab. 6.7),

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}\,[\text{cm}^2/\text{s}],$$

unde c este căldura specifică, în cal/g·grd, iar ρ — densitatea, în g/cm³.

Pentru scopuri tehnice sînt foarte utile unele metode de aproximaţie. Trebuie menţionate în special metoda diferenţială, propusă de E. Schmidt, precum şi metodele analoge electrice. Aceste metode se bazează pe similitudinea ecuaţiilor diferenţiale care exprimă legile cîmpului termic pe de o parte şi legile cîmpului electromagnetic pe de altă parte.

Convecţia

Se face o deosebire între mişcarea naturală a mediului care transportă căldură (de ex. ridicarea aerului cald) şi mişcarea forţată (de ex. printr-un ventilator). Dacă o suprafaţă de arie A cm² are o temperatură θ_1 şi dacă mediul care curge de-a lungul acestei suprafeţe are o temperatură θ_2, cantitatea de căldură transmisă prin această suprafaţă într-o secundă este

$$\frac{Q}{t} = \alpha A(\theta_1 - \theta_2),$$

unde α este coeficientul de transfer termic, în cal/cm². s. grd, care ţine seama de toţi factorii care influenţează curgerea şi transferul de căldură; α depinde de temperatură, de caracteristicile suprafeţei, de viscozitatea mediului, de viteza mediului, de felul curgerii (laminară sau turbulentă).

Ca exemplu, se indică formula aproximativă a lui Nusselt, valabilă pentru transferul de căldură pe un perete vertical plan, pentru convecţie naturală:

$$\alpha = 6{,}1\cdot10^{-5}\sqrt[4]{\theta_1 - \theta_2}\left[\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2\ \text{s. grd}}\right]$$

Tabelul 6.4. **Coeficientul de transfer de căldură α pentru convecţia artificială pe un perete neted (după Jörges)**

$v_{red} = v_{ef}\,\frac{293}{273 + \theta_{aer}}$	Temperatura medie de 20 °C pentru mediul fluid Valori pentru	
	$v_{red} \leqslant 5$ m/s	$v_{red} > 5$ m/s
Pe pereţi netezi .... $\alpha \times 10^5 =$	$13{,}4 + 9{,}4\ v_{red}$	$17{,}0\ (v_{red})^{0{,}78}$
Pe pereţi cu rugozitate .... $\alpha \times 10^5 =$	$14{,}7 + 10{,}0\ v_{red}$	$18{,}0\ (v_{red})^{0{,}78}$

v_{red} — viteza aerului, în m/s, redusă la 20 °C; v_{ef} — viteza reală a aerului cald, în m/s.

Radiaţia de căldură

Radiaţiile de căldură (radiaţii infraroşii, radiaţii termice) sînt unde electromagnetice. Poziţia lor în cadrul spectrului electromagnetic se poate vedea din fig. 2.43, pag. 130.

În cazul incidenţei pe un corp a unei radiaţii de intensitatea 1, fracţiunea reflectată reprezintă coeficientul de reflexie R, fracţiunea absorbită — coeficientul de absorbţie A şi fracţiunea care trece prin corp — coeficientul de permeabilitate D. Avem:

$$R + A + D = 1.$$

În funcţie de mărimea acestor coeficienţi diferiţi de radiaţie, un corp se numeşte:

— alb, dacă $R = 1$, adică dacă radiaţia incidentă este complet reflectată;
— cenuşiu, dacă R este cuprins între 0 şi 1, fiind independent de lungimea de undă în domeniul considerat;
— negru, dacă $A = 1$, adică dacă radiaţia incidentă este complet absorbită.

Corpul negru este caracterizat nu numai prin faptul că absoarbe complet radiaţia incidentă, dar şi prin faptul că emite cantitatea maximă posibilă de radiaţie termică, aşa zisa „radiaţie a corpului negru", la orice temperatură şi pentru orice lungime de undă. Pentru corpul negru, de căldură q (radiată) este dată de legea Ştefan-Boltzmann

$$q = \sigma T^4,$$

unde: σ = $1{,}38 \cdot 10^{-12}$ cal/s. cm² (grd)⁴ este constanta de radiaţie a corpului negru;
T — temperatura absorbită, în grade K ($T = 273{,}16 + \theta$).

În practică, legea Ştefan-Boltzmann se foloseşte frecvent într-o formă puţin schimbată prin faptul că densitatea fluxului de căldură q nu se măsoară în cal/cm²·s, ci în kcal/m²·h, ceea ce dă

$$q = C_N \left(\frac{T}{100}\right)^4 .$$

Coeficientul de radiaţie al corpului negru are în acest caz valoarea

$$C_N = 4{,}96 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot (100 \text{ grd})^4 .$$

La transferul de căldură prin radiaţie trebuie să se ţină seama nu numai de emisia corpului conform ecuaţiei de mai sus, dar şi de radiaţia incidentă pe corp din mediul ambiant, care se poate afla, ţinînd seama de poziţia geometrică a suprafeţelor radiante, conform aceleiaşi legi; această radiaţie compensează în parte radiaţia emisă de corp.

Orice alt corp emite o radiaţie de căldură mai mică decît corpul negru, iar raportul între emisivitatea E a corpului respectiv şi cea a corpului negru E_N este egal cu coeficientul lor de absorbţie A

$$\frac{E_\lambda}{E_{N\lambda}} = A_\lambda .$$

Pentru corpuri „cenuşii", A este, conform definiţiei, independent de λ.

Pentru cantitatea de căldură radiată în unitatea de timp pe unitatea de suprafaţă, rezultă pentru corpul cenuşiu:

$$q = C\left(\frac{T}{100}\right)^4,$$

unde $C = AC_N$ este coeficientul de radiaţie.

Radiatoarele şi receptoarele termice pot fi considerate, cu o bună aproximaţie, drept corpuri cenuşii (v. tabelele 6.5, 6.6 şi 6.7)

Tabelul 6.5. **Caracteristicile termice pentru diferite materiale**

Materialul	Domeniul de temperatură °C	Căldura specifică medie c_m $\frac{kcal}{kg\ grd}$	Căldura latentă de evaporare γ $\frac{kcal}{kg}$	Căldura latentă de fuziune s $\frac{kcal}{kg}$
Metal:				
Aluminiu	20	0,214	2800	85
	18...300	0,2290		
	18... 500	0,237		
Plumb	20	0,031	220	5,7
Fier pur	0... 100	0,111	1520	65
Oţel cu 1,25%C; 0,46%Si; 0,62% Mn	10... 130	0,1225	—	—
Cupru	18... 100	0,0928	1110	50
Cărămidă refractară:				
Sillimanită	20...1000	0,175	—	—
Şamotă	20...1000	0,261	—	—
Corund	20... 100	0,203	—	—
Alte materiale:				
Beton	20	0,21	—	—
Sticlă de cuarţ	0... 500	0,23	—	—
Porţelan	0...1000	0,26	—	—
Faianţă	20... 100	0,186	—	—
Cărămidă	20	0,16	—	—
Apă	20	0,9986	539,1	79,4

Tabelul 6.6. **Coeficienţii de radiaţie pentru diferitele materiale** [1])

Materialul	Calitatea suprafeţei	Coeficientul de radiaţie C $\frac{kcal}{m^2h(100\ grd)^4}$
a) La temperatura camerei		
Corpul negru		4,96 ± 0,07
Metale curate:		
Aluminiu	Lustruită	0,26
Cupru	Lustruită	0,20
Alamă	Lustruită	0,25
Nichel	Tablă de oţel nichelată, lustruită	0,27...0,30

[1]) Conform cu Schack, A.: „Der industrielle Wärmeübergang" (Transferul termic industrial), ediţia a 5-a, Düsseldorf, 1957.

Tabelul 6.6 (continuare)

Materialul	Calitatea suprafeţei	Coeficientul de radiaţie C $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}(100\ \text{grd})^4}$
Metale oxidate:		
Plumb	Oxidat, cenuşiu	1,4
Oţel	Laminat la cald	3,2 ...3,3
Oţel	Turnat la suprafaţă netedă sau rugoasă	4,0 ...4,1
Cupru	Negru	3,9
Acoperiri:		
Lac de aluminiu	Cu lac pe tablă de oţel	1,9 ...2,0
Lac email	Alb strălucitor	4,5
Lac	Negru, lucitor	4,4
Vopsea cu ulei	....	3,9
Email	Alb	4,5
Materiale de construcţie, sintetice şi naturale:		
Carton asfaltat	....	4,5
Lemn de stejar	Dat la rindea	4,4
Ipsos	Cu grosime de 0,5 mm	4,5
Sticlă	Neted	4,7
Mortar de var	Rugos, alb	4,6
Hîrtie	....	4,0
Porţelan	Glazurată	4,6
Materiale de lînă, mătase şi bumbac	....	3.9
Cărămidă	Roşie, aspră, însă fără denivelări mari	4,6

b) La temperaturi mai ridicate

Oţel	Oxidată, netedă la	800°C	4,6
Cărbune	Şlefuită 0,9% cenuşă la	630°C	3,9
Şamotă	Glazurată prin utilizare practică, la	1000°C	3,7
Cărămidă de silice	Aspră, la	1000°C	4,0

Tabelul 6.7. **Coeficienţii de difuzie pentru diverse materiale**

Materialul	Coeficientul de difuzie cm²/s	Materialul	Coeficientul de difuzie cm²/s
Alamă	0,33...0,35	Azbest	0,00035...0,00046
Aliaj cu cositor	—	Asfalt	0,005...0,007
Aliaj Wood	0,089	Aur	1,24
Alpaca	0,074	Bariu	—
Aluminiu	0,853	Beriliu	0,526
Ambră	—	Beton	0,004...0,008
Antimoniu	1,56	Bismut	0,097
Argint	1,717	Bronz	0,08...0,22
Arsen	—	Cadmiu	0,455

Tabelul 6.7 (continuare)

Materialul	Coeficientul de difuzie cm²/s	Materialul	Coeficientul de difuzie cm²/s
Calciu	—	Magneziu	0,93
Carbon:		Mangan	0,14
Diamant	—	Manganină	0,064
Grafit	0,31	Mercur	0,044
Cox	0,022...0,026	Mică	0,0027...0,0034
Carbon	—	Molibden	0,53
Cărbune	—	Nichel	0,208
Turbă	—	Paladiu	0,198
Cărbune de lemn	0,0019	Parafină	0,0013...0,0014
Cauciuc	0,0015...0,0016	Platină	0,248
Ceară	0,00013...0,00014	Plumb	0,233
Ciment	0,073	Plută	0,009...0,0019
Constantan	0,063	Potasiu	1,51
Crom	0,219	Reniu	0,251
Cupru	1,12	Rodiu	0,27
Fenol	—	Seleniu (metalic)	—
Fibră vulcan	0,0023...0,030	Siliciu	—
Fier	0,195	Sodiu	1,18
Fontă	0,11	Staniu	0,400
Fier chimic pur	0,195	Sticlă (în medie)	0,0033...0,0044
Invar	0,028	Sticlă de cuarţ	0,0088
Oţel	0,12	Sulf (ortorombic)	0,0014
Fosfor	—	Tantal	0,237
Galiu	—	Titan	—
Germaniu	0,33	Toriu	—
Indiu	—	Tungsten	0,646
Iridiu	0,195	Uraniu	—
Lemn	0,00013...0,00014	Var ars	—
Abanos	—	Vopsea de email	—
Brad	—	Zgură de furnal	0,0035
Stejar	0,0009...0,002	Zinc	0,434
Molid	0,0007...0,0015		

6.5. RĂCIREA MAŞINILOR ELECTRICE

6.5.1. Debitul necesar al agentului de răcire pentru maşinile cu ventilaţie interioară

Pierderile P_p, care se produc în maşină, sînt transmise mediului de răcire, în funcţie de capacitatea lui termică $c\rho$, rezultînd o creştere a temperaturii $\Delta\theta$ a acestui mediu

$$P_p = c\rho K \Delta\theta,$$

de unde se poate calcula debitul necesar al agentului de răcire pentru o creştere dată a temperaturii

$$K = \frac{P_p}{c\rho\Delta\theta}$$

unde: c este căldura specifică a agentului de răcire la presiunea constantă, în kWs/kg · grd; dacă căldura specifică este dată în kcal/kg.grd, se va înmulţi cu factorul de transformare 4,19 kWs/kcal;
K — debitul agentului de răcire, în m³/s;
P_p — suma pierderilor electrice şi mecanice, în kW, minus căldura radiată de carcasa motorului şi cea preluată de uleiul de ungere a lagărelor;
$\Delta\theta$ — creşterea temperaturii agentului de răcire, în grd;
ρ — densitatea agentului de răcire la temperatura θ, în locul în care se măsoară debitul, în kg/m³.

Încărcarea admisibilă a agentului de răcire

Încărcarea agentului de răcire P_p/K depinde de creşterea admisibilă a temperaturii agentului. Valorile date în tabelul 6.8 se referă la agenţii de răcire utilizaţi în mod normal.

Tabelul 6.8. **Încărcarea admisibilă pentru agentul de răcire**

Agentul de răcire	$\Delta\theta$ grd	P_p/K pentru θ = 40°C $\frac{kW}{m^3/s}$
Aer sau hidrogen	20...30	23...34
Hidrogen:		
1 at suprapresiune	25	57
2 at suprapresiune	25	85
3 at suprapresiune	25	114
Apă	10...20	42...84 · 10³

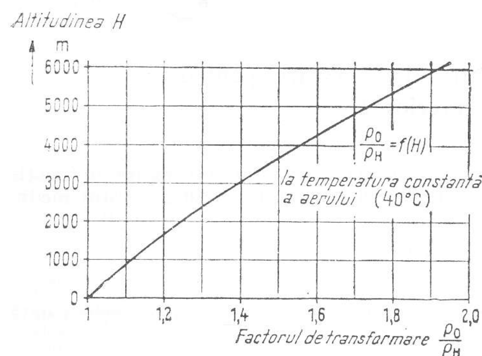


Fig. 6.1. Efectul altitudinii asupra debitului necesar al agentului de răcire

Efectul altitudinii asupra răcirii cu aer

Dacă K este debitul agentului de răcire necesar la nivelul mării (H = 0), debitul necesar la altitudinea H va fi

$$K_H = K\rho_0/\rho_H.$$

Pentru valorile factorului de transformare ρ_0/ρ_H vezi fig. 6.1.

6.5.2. Creşterea temperaturii

Creşterea temperaturii unei părţi componente a unui motor, de ex. a înfăşurării lui, se compune din trei

părţi: 1) creşterea de temperatură a agentului de răcire în locul părţii respective a maşinii; 2) diferenţa de temperatură între partea respectivă a maşinii şi agentul de răcire, determinată de transferul de căldură; 3) diferenţa de temperatură dintre partea respectivă a maşinii şi suprafaţa răcită, determinată de conductivitatea termică a straturilor intermediare:

$$\theta_i = \Delta\theta_1 + \theta_\alpha + \theta_\lambda ,$$

$$\theta_i = \frac{\Sigma P_p}{c\rho K} + \frac{V_i}{A}\frac{1}{\alpha} + \frac{V_i}{A}\frac{s}{\lambda_s},$$

unde: V_i este fluxul de căldură eliminat de partea respectivă a motorului;
A — suprafaţa răcită de agent;
α — coeficientul de transfer de căldură;
s — grosimea straturilor intermediare, avînd conductivitatea termică λ_s.

Transferul de căldură

Căldura transmisă de o parte a motorului agentului de răcire depinde de mărimea A a suprafeţei părţii respective, de coeficientul de transfer de căldură α şi de diferenţa de temperatură θ_α între partea respectivă a motorului şi agentul de răcire:

$$V_i = \alpha A\theta_\alpha ,$$

unde θ_α este definit ca:

$$\theta_\alpha = \theta_A - \left(\theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}\right),$$

unde:
θ_A este temperatura pe suprafaţa părţii respective a maşinii;
θ_0 — temperatura agentului de răcire cînd vine în contact cu partea respectivă;
$\Delta\theta$ — creşterea temperaturii agentului de răcire în apropierea părţii respective a maşinii.

Coeficientul de transfer de căldură sub forma dată de Nusselt (factorul Nusselt) este

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_k}$$

unde:
D este o lungime caracteristică pentru geometria construcţiei respective, de ex. diametrul ţevii în cazul unei ţevi;
λ_k — conductivitatea termică a agentului de răcire.

Ecuaţiile empirice indicate de Nusselt, avînd forma:

Nu = f (Re, Pr) pentru convecţie forţată

şi

Nu = f (Gr, Pr) pentru convecţia naturală,

permit stabilirea relaţiilor între transferul de căldură, viteza agentului de răcire şi caracteristicile fizice ale agentului. Mărimile care apar în aceste ecuaţii sînt:

— numărul lui Reynolds

$$Re = \frac{wD}{\nu} = \frac{wD\rho}{\mu},$$

$$\nu = \mu/\rho$$

— numărul lui Prandtl

$$Pr = \frac{c\mu}{\lambda_k} = \frac{c\nu\rho}{\lambda_k};$$

— numărul lui Grashof

$$Gr = \frac{g\beta\theta_\alpha D^3}{\nu^2}$$

unde:

w este viteza de curgere;
D — lungimea caracteristică a formei geometrice respective;
υ — viscozitatea dinamică;
μ — viscozitatea cinematică;
g — acceleraţia gravitaţiei;
β — $1/T$, coeficientul de expansiune;
T — temperatura agentului de răcire, în K.

Calculul coeficientului mediu de transfer de căldură în cazul convecţiei forţate[1])

Curgerea în lungul unui perete plan

În acest caz, lungimea caracteristică este lungimea de curgere.

în cazul unui strat limită laminar, adică pentru $Re < 10^5$,

$$Nu = 0{,}664\ Re^{0{,}5}\ Pr^{0{,}4}$$

relaţie aplicabilă pentru apă, ulei şi gaz.

în cazul unui strat limită turbulent, adică pentru $Re > 10$

$$Nu = 0{,}037\ Re^{0{,}8}\ Pr^{0{,}4}$$

relaţie aplicabilă pentru apă, ulei şi gaze.

1) După Michejew, Bazele transferului de căldură.

Curgerea printr-o conductă cu secţiune circulară.

În acest caz, lungimea caracteristică este diametrul ţevii.

în cazul unei curgeri laminare, adică pentru $Re < 2\,300$

$$Nu = 0{,}15\ \varepsilon_l\ Re^{0{,}3}\ Pr^{0{,}4},$$

unde ε_l este un factor de admisie, care depinde de lungimea relativă L/D a ţevii respective (tabelul 6.9).

Tabelul 6.9. **Factorul de admisie la curgerea laminară**

L/D	1	2	5	10	20	30	50
ε_l	1,9	1,7	1,44	1,27	1,13	1,05	1,0

în cazul unei curgeri turbulente, adică pentru $Re > 8\,000$ (tabelul 6.10),

$$Nu = 0{,}021\ \varepsilon_t\ Re^{0{,}8}\ Pr^{0{,}4}.$$

Tabelul 6.10. **Factorul de admisie la curgere turbulentă**

	Re \ L/D	1	2	5	10	20	50
ε_t	10^4	1,65	1,50	1,34	1,23	1,13	1
	10^5	1,28	1,22	1,15	1,10	1,06	1
	10^6	1,14	1,11	1,08	1,05	1,03	1

Cele două ecuaţii se aplică de asemenea pentru apă, ulei şi gaze.
în domeniul de tranziţie (tabelul 6.11) adică pentru $2\,000 < Re < 10^6$

$$Nu = zPr^{0{,}4}$$

cu limitele z_1 şi z_2

$$z_{1,2} = f(Re).$$

Tabelul 6.11. **Limitele în zona tranzitorie**

Re	2,1 ×	2,3 ×	2,5 ×	4 ×	6 ×	10×10^3
z_1	1,9	3,3	4,4	11,4	19,5	33,5
z_2	9,5	10,3	11,0	16	22	

Curgerea prin conductă cu secțiune transversală oarecare

În locul diametrului țevii D, se va utiliza diametrul hidraulic HD

$$HD = \frac{4F}{U}$$

unde: F este secțiunea transversală a curgerii;
U — perimetrul umezit, indiferent dacă această suprafață ia parte la transferul de căldură sau nu.

De exemplu, în cazul unei conducte cu o secțiune transversală alungită (oblong) avînd parametrii principali a și b, diametrul hidraulic este:

$$HD = \frac{4\,ab}{2(a+b)} = \frac{2\,a}{1+\frac{a}{b}}.$$

În cazul curgerii printr-o fantă, pentru care b este mult mai mare decît a, acest diametrul hidraulic va fi

$$HD = 2\,a \text{ (aproximativ)}$$

Curgerea transversală pe un cilindru

a) $Re < 10^3$: $Nu = 0{,}59\ Re^{0,5}\ Pr^{0,4}$

b) $Re > 10^3$: $Nu = 0{,}21\ Re^{0,6}\ Pr^{0,4}$.

Calculul coeficentului mediu de transfer de căldură în caz de convecție naturală

Numărul mediu Nusselt pentru un corp avînd înălțimea D poate fi apreciat, folosind tabelul 6.12, dacă sînt cunoscute numerele Grashof și Prandtl.

Tabelul 6.12. **Coeficientul mediu de transfer termic la convecție naturală**

$Gr \times Pr$	1	pînă la $5 \cdot 10^2$	pînă la $2 \cdot 10^7$	pînă la 10^{13}
Nu	0,5	$1{,}18\,(Gr \times Pr)^{0,12}$	$0{,}54\,(Gr \times Pr)^{0,25}$	$0{,}135\,(Gr \times Pr)^{0,33}$

Influența agentului de răcire asupra transferului de căldură

Re, Gr, și Pr depind de caracteristicile fizice ale agentului de răcire. În tabelul 6.14 se dau datele pentru agenții de răcire cei mai importanți, în funcție de natura lor.

Densitatea ρ crește proporțional cu creșterea presiunii gazului, pe cînd viscozitatea cinematică ν scade aproximativ în aceeași proporție ca și presiunea gazului.

În cazul hidrogenului, gradul de puritate are un efect considerabil asupra densității gazului ρ, asupra căldurii specifice c și asupra conductivității termice λ. Capacitatea termică c_ρ, din contră, este practic independentă de gradul de puritate al oxigenului. În tabelul 6.13 se dau factorii respectivi de influență în funcție de gradul de puritate $1 - x$, unde x este proporția de gaz străin raportată la volumul total.

Tabelul 6.13. **Efectul gradului de puritate 1−x asupra caracteristicilor fizice ale hidrogenului**

Impurificare cu aer	$1 - x$	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95
	f_ρ	1,0	1,13	1,26	1,40	1,53	1,66
	c	1,0	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95
H_2 + aer	f_λ	1,0	0,97	0,94	0,91	0,88	0,86
Impurificare cu bioxid de carbon	f_ρ	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
	c	1,0	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95
$H_2 + CO_2$	f_λ	1,0	0,95	0,90	0,87	0,83	0,80

Tabelul 6.14. **Caracteristicile agenților de răcire**

Agentul de răcire	Temperatura θ °C	Densitatea ρ kg/m³	Căldura specifică c $\frac{kWs}{kg\ grd}$	Capacitatea c_ρ $\frac{kWs}{m^3 \cdot grd}$	Conductivitatea termică λ W/m · grd	Viscozitatea cinematică ν m²/s	Numărul lui Prandtl $P_r = \frac{c\nu p}{\lambda}$
Hidrogen H_2	20 40 60	0,085 0,080 0,076	14,3	1,22 1,14 1,09	0,186 0,197 0,206	$10^{-6} \times$ {105 114 127	0,67
Heliu He	20 40 60	0,168 0,159 0,149	5,2	0,87 0,83 0,77	0,151 0,158 0,161	$10^{-6} \times$ {117 128 141	0,67
Amoniac NH_2	20 40 60	0,695 0,650 0,610	2,2	1,53 1,43 1,34	0,023 0,024 0,027	$10^{-6} \times$ {14,4 16,5 18,9	0,96
Azot N_2	20 40 60	1,17 1,09 1,02	1,04	1,22 1,14 1,06	0,025 0,026 0,0265	$10^{-6} \times$ {15,0 16,8 18,8	0,74
Aer uscat	20 40 60	1,20 1,13 1,06	1,0	1,20 1,13 1,06	0,026 0,027 0,0285	$10^{-6} \times$ {15,1 17,0 18,9	0,71
Bioxid de carbon CO_2	20 40 60	1,78 1,67 1,57	0,84	1,50 1,40 1,32	0,016 0,017 0,0185	$10^{-6} \times$ {8,2 9,3 10,4	0,80
Uleiuri minerale ușoare	20 40 60	878 865 853	1,9	1670 1640 1620	0,12	$10^{-6} \times$ {31,2 13,3 6,0	434 182 86
Apă H_2O	20 40 60	998 992 983	4,2	4190 4170 4130	0,598 0,628 0,652	$10^{-6} \times$ {1,00 0,66 0,48	7,0 4,35 3,0

De exemplu densitatea hidrogenului impurificat ar fi

$$\rho_{1-x} = f_{\rho}\, \rho_{1,0}.$$

O relaţie similară există de asemenea pentru căldura specifică şi conductivitatea termică.

6.5.3. Conductivitatea termică

Căldura evacuată dintr-o parte a maşinii înconjurată de un strat cu efect de ecranare (izolaţie), este

$$V_1 = \frac{\lambda}{s} A\theta_{\lambda}$$

unde:

θ_λ este gradientul de temperatură în stratul de ecranare;
A — aria suprafeţiei prin care se evacuează căldura;
s — grosimea stratului de ecranare;
λ — conductivitatea termică a stratului de ecranare.

Dacă există mai multe straturi cu efecte de ecranare, gradientul total de temperatură va fi

$$\theta_{\lambda} = \frac{V}{A}\left[\left(\frac{s}{\lambda}\right)_1 + \left(\frac{s}{\lambda}\right)_2 + \ldots\right].$$

În tabelul 6.15 se dau conductivităţile termice pentru diferite materiale şi agenţi de răcire, utilizate în practică.

Tabelul 6.15. **Conductivitatea termică pentru diferite materiale şi agenţi de răcire λ în W/m · grd**

Metale		Alte materiale		Agentul de răcire la 40 °C	
Argint	400	Repelit	0,30	Aer	0,03
Cupru	380	Lemn	0,20	Bioxid de carbon CO_2	0,02
Aluminiu	210	Porţelan	0,90	Hexafluorură de sulf SF_6	0,01
Alamă 70/30	110	Sticlă	1,10	Hidrogen, H_2	0,20
Oţel	40...60	Plexiglass	0,20	Hidrogen (97%) + bioxid de carbon H_2+CO_2	0,17
		Azotură de bor	35	Heliu, He	0,16
Mercur, Hg	9,30	Araldit B	0,20		
Oţel nichel-crom	16	Araldit B + nisip de cuarţ	1,30	Ulei	0,12
				Apă, H_2O	0,63
Tole de dinam, în sens longitudinal	20 ... 40	Lac	0,16		
Tole de dinam, în sens transversal	1 ... 2	Izolaţie de şelac	0,22		

7. CARACTERISTICILE MAŞINILOR ELECTRICE

7.1. MAŞINA SINCRONĂ

7.1.1. Caracteristicile maşinilor sincrone

Tensiunile şi curenţii sînt exprimaţi în unităţi relative ca raportul între valoarea lor reală şi valoarea lor nominală.

Curenţii de excitaţie sînt exprimaţi ca raportul între valoarea lor reală şi curentul de excitaţie la mers în gol la tensiunea nominală i_0 (unităţi relative).

Notaţii folosite:

i_e — curentul de excitaţie;
i_{e0} — curentul de excitaţie la mers în gol, la tensiunea nominală;
i_{ek} — curentul de excitaţie corespunzător unui curent de scurtcircuit trifazat simetric egal cu curentul nominal;
I_N — curentul nominal;
I_k — curentul permanent de scurtcircuit;
I_{k0} — curentul permanent de scurtcircuit pentru o excitaţie corespunzătoare funcţionării în gol la tensiune nominală;
I_{k0}/I_N — raportul curenţilor la scurtcircuit;
U_N — tensiunea nominală;
U_1 — tensiunea de fază.

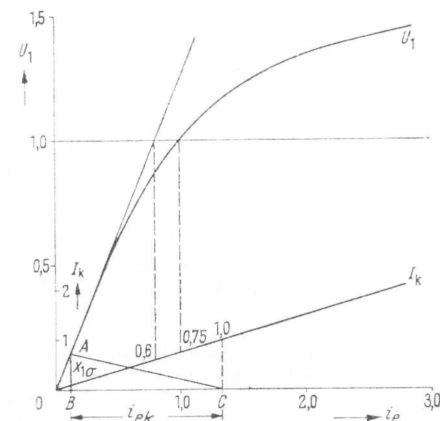


Fig. 7.1. Caracteristicile la mersul in gol şi la scurtcircuit.

$$\frac{I_{k0}}{I_N} = \begin{cases} 0{,}6 \text{ nesaturat} \\ 0{,}75 \text{ saturat} \end{cases}$$

ABC — Triunghiul Potier;
AB — căderea de tensiune corespunzătoare reactanţei de dispersie a statorului, în unităţi relative (pentru curentul nominal);
BC — reacţia indusului — unităţi relative (pentru curentul nominal).
$x_{1\sigma}$ — reactanţă de dispersie a statorului, în unităţi relative.

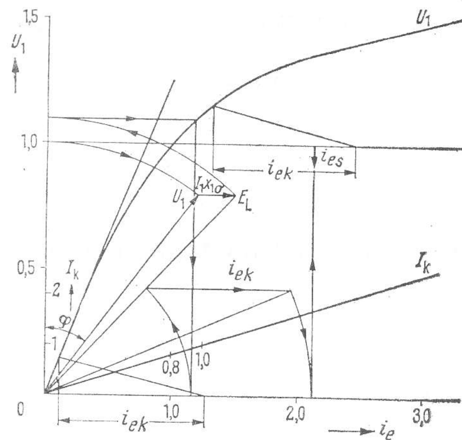


Fig. 7.2. Determinarea curentului de excitaţie i_e în sarcină.

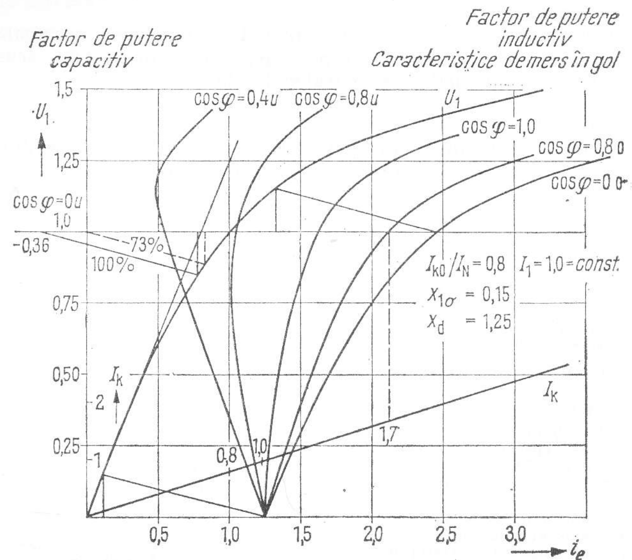


Fig. 7.3. Variaţia tensiunii la bornele maşinii funcţie de curentul de excitaţie $U_1 = f(i_e)$, pentru curent statoric constant I = const şi factor de putere constant $\cos \varphi$ = const.

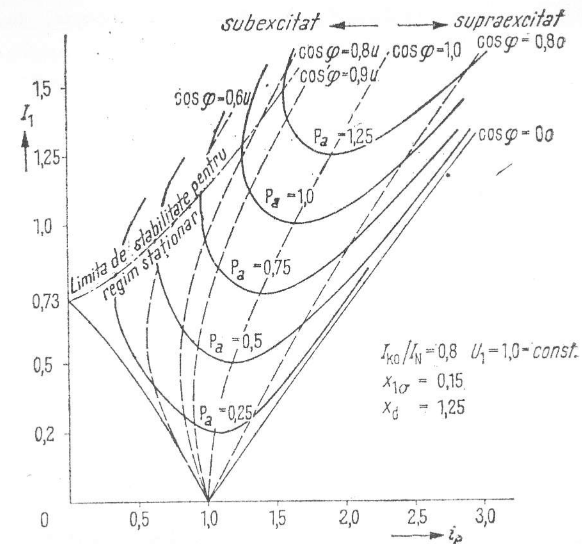


Fig. 7.4. Variaţia curentului statoric funcţie de curentul de excitaţie $I_1 = f(i_e)$ la funcţionarea în paralel cu un sistem de putere infinită şi cu tensiunea la borne constantă U = const.
———— pentru putere activă constantă (curbele în V). Pa = const.;
.... pentru factor de putere constant, $\cos \varphi$ = const.

7.1.2. Reactanţele maşinilor sincrone

Reactanţele sincrone longitudinale şi transversale x_d şi x_q

$$\text{Notînd } X_d = \frac{U_1}{I_k}\ \Omega \text{ şi } X_N = \frac{U_N}{I_N}\ \Omega$$

unde: U_N şi U_1 sînt tensiunile de fază, în V;

I_N şi I_k — curenţii de fază, în A,

se obţine

$$x_d = \frac{X_d}{X_N} = \frac{U_1}{I_k} \cdot \frac{I_N}{U_N}$$

sau

$$x_d = \frac{U_1/U_N}{I_k/I_N} \text{ (unităţi relative).}$$

Pentru $U_1/U_N = 1{,}0$ rezultă $I_k = I_{k0}$, deci I_{k0}/I_N este raportul de scurtcircuit la mers în gol.

$$x_d = \frac{1}{I_{k0}/I_N}\ ; \quad x_d = x_a + x_{1\sigma};$$

reactanţa transversală

$$x_q = \frac{c_q}{c_d}\, x_a + x_{1\sigma}\ ; \quad \frac{c_q}{c_d} = f\left(\frac{b}{\tau}\right),$$

unde: x_a este reactanţa corespunzătoare cîmpului de reacţiune;
b — lăţimea polilor;
τ — pasul polar;
c_d, c_q v. mai jos[1]).
Exemplu (fig. 7.5):

$$x_d(nesaturat) = \frac{1}{0{,}6} = 1{,}66\ (166\%),\ \text{(unităţi relative)};$$

$$x_d(saturat) = \frac{1}{0{,}75} = 1{,}33, \quad x_{1\sigma} = 0{,}15\ \text{(unităţi relative)};$$

$$\frac{c_q}{c_d} \approx 0{,}55 \text{ pentru } \frac{b}{\tau} = 0{,}75;$$

$$x_a = 1{,}66 - 0{,}15 = 1{,}51\ (151\%);$$

$$x_q = 0{,}55 \cdot 1{,}51 + 0{,}15 = 0{,}98\ (98\%).$$

c_q şi c_d sînt factori de reducere. I_{k0}/I_N determină de asemenea puterea subexcitată admisibilă P_c a unui generator în cazul funcţionării pe o linie aeriană lungă.

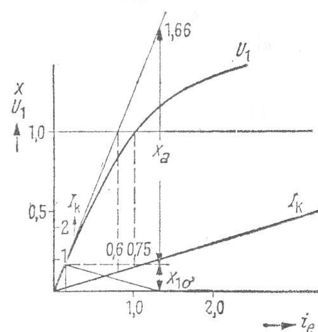


Fig. 7.5. Reactanţele sincrone.

$$\frac{P_c}{P_N} \approx 0{,}9\,\frac{I_{k0}}{I_N}\ ; \quad P_c = \frac{U^2}{x_c},$$

unde: P_N este puterea nominală, în kVA;

$x_c \approx 350 \cdot 10^3\ \Omega$ km (pînă la 220 kV, 50 Hz linie monofazată).

$$\text{De exemplu la 220 kV } P_c = \frac{220^2}{350} = 138 \text{ kVA/km}.$$

Reactanţele tranzitorii

Reactanţele supratranzitorii x''_d, x''_q

$x_{2\sigma}$—reactanţa de dispersie a înfăşurării excitaţiei

[1] E. v. Rziha, Starhstromtechnik, ediţia a 8-a, 1955, pag. 440.

$x_{3\sigma}$ — reactanţa de dispersie a înfăşurării de amortizare;
$x_{L\sigma}$ — reactanţa de dispersie longitudinală rezultantă a rotorului.

Reactanţa longitudinală supratranzitorie x''_d (fig. 7.6)

$$x''_d = x_{1\sigma} + \frac{x_a x_{L\sigma}}{x_a + x_{L\sigma}};$$

$$x_{L\sigma} = \frac{x_{2\sigma} x_{3\sigma}}{x_{2\sigma} + x_{3\sigma}};$$

$$x''_d \approx x_{1\sigma} + x_{3\sigma}.$$

Reactanţa transversală supratranzitorie x''_q

$$x''_q = x_{1\sigma} + \frac{x_a x_{3\sigma} c_q/c_d}{x_a c_q/c_d + x_{3\sigma}}.$$

În cazul maşinilor cu piese polare laminate şi fără înfăşurare de amortizare:

$$x_{3\sigma} = \infty, \text{ adică } x''_q = x_q.$$

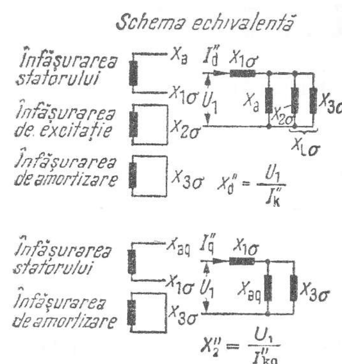


Fig. 7.6. Reactanţele supratranzitorii.

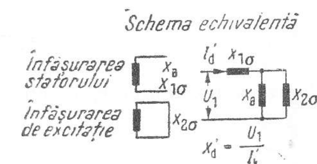


Fig. 7.7. Reactanţa tranzitorie.

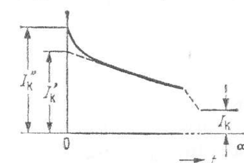


Fig. 7.8. Amplitudinea componentei alternative a curentului de scurtcircuit brusc.

În tabelul 7.1 sînt date valori ale raportului x''_q/x''_d pentru diferite execuţii ale înfăşurării de amortizare.

Tabelul 7.1. **Valori ale raportului x''_q/x''_d pentru diferite execuţii ale înfăşurării de amortizare**

Execuţie	x''_q/x''_d
Cu colivie completă de amortizare	0,9...1,2
Amortizare numai pe axa longitudinală şi poli lamelaţi	2...3
Fără înfăşurare de amortizare cu poli lamelaţi	3...4
Cu piese polare masive	1,5...1,8

Reactanțele tranzitorii x'_d și x'_q

$$x'_d = x_{1\sigma} + \frac{x_a x_{2\sigma}}{x_a + x_{2\sigma}},$$

unde: $x'_q = x_q$;

x_d(saturat) $\approx 0,88\, x'_d$ (nesaturat).

Măsurarea lui x'_d și x''_d din încercarea la scurtcircuit trifazat simetric brusc:

$$x''_d = \frac{U_1}{I''_k}; \quad x'_d = \frac{U_1}{I'_k}.$$

Reactanțele la sarcini asimetrice

Reactanța de succesiune inversă a fazelor (reactanța inversă)

$$x_2 = \frac{U_2}{I_2},$$

unde: U_2 este tensiunea sistemului invers;
I_2 — curentul sistemului invers.

$$x_2 \approx \frac{x''_d + x''_q}{2}.$$

Măsurarea reactanței x_2 la un scurtcircuit bifazat fig. (7.9):

$$x_2 = \frac{U_{AC}}{\sqrt{3}\, I_{kAB}}.$$

Reactanța homopolară

$$x_0 = \frac{U_0}{I_0}$$

unde: U_0 este tensiunea sistemului homopolar;
I_0 — curentul sistemului homopolar.

Măsurarea lui x_0 (v. fig. 7.10). Generatorul funcționează cu înfășurarea de excitație scurtcircuitată, tensiunea U este aplicată la o sursă exterioară.

$$x_0 = \frac{U}{3I_k}.$$

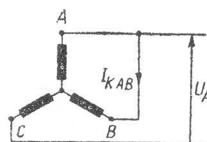


Fig. 7.9. Măsurarea reactanței inverse.

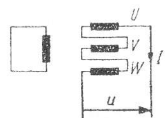


Fig. 7.10. Măsurarea reactanței homopolare.

Tabelul 7.2. **Valori tipice pentru reactanțe relative ale mașinilor sincrone de fabricație germană *)**

Execuție		Saturat x_d	$x_d = x'_q$	x'_d 1)	x''_d	x''_q	$x_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2}$	x_0 2)
Turbogeneratoare cu doi poli		1,2 ... 2,0	1,10...1,8 3)	0,16...0,26	0,10...0,15	0,10...0,15	0,09...0,15	0,02...0,1
Generatoare cu poli aparenți, cu înfășurări de amortizare longitudinală și transversală	mai puțin de 16 poli	0,8 ...1,4	0,52...0,9	0,22...0,35	0,14 4)...0,23	0,14...0,26	0,14...0,25	0,03...0,2
	cu 16 poli și mai mult	0,75...1,25	0,45...0,8	0,25...0,4	0,15 4)...0,25	0,16...0,28	0,15...0,27	0,03...0,22
Generatoare cu poli aparenți, fără înfășurare de amortizare	mai puțin de 16 poli	0,8 ...1,4	0,52. .0,9	0,22...0,35	0,22...0,35	0,52...0,9	0,36...0,63	0,04...0,24
	cu 16 poli și mai mult	0,75...1,25	0,45...0,8	0,25...0,4	0,25...0,4	0,45...0,8	0,35...0,6	0,04...0,3

1) În caz de saturație, valorile lui x'_d scad la 88% din valorile în stare nesaturată.
2) x_0 depinde în primul rînd de scurtarea pasului înfășurării statorice s/τ, precum și de execuția pieselor polare (lățimea b, raportul b/τ și întrefierul δ); pentru $b/\tau \approx 0,8$, pentru $\delta/\tau \geq 0,02$ } și un pas scurtat $s/\tau \approx 10/12$, $x_0 \approx 0,7\, x_{1\sigma}$.
3) Valabil numai pentru mașina cu poli lamelați, fără înfășurare de excitație pe axa transversală. Pentru poli masivi: $x_q \approx 1,5\, x'_d \ldots 3,0\, x'_d$.
4) Dacă dinții sînt saturați în măsură apreciabilă, valorile pentru x''_d scad la 90% din valorile pentru cazul nesaturat.
*) Datele din tabel sînt valabile și pentru mașinile de fabricație românească.

Utilizarea diferitelor reactanţe

Curentul de scurtcircuit permanent

$$I_k = \frac{U_1}{x_d} \text{ (pentru } U_1 = 1,0;\ I_{k0}).$$

Curentul de scurtcircuit trifazat simetric brusc

$$I''_k = \frac{U}{x''_d},$$

de ex. dacă $x''_d = 0,12$ (adică 12%), $I''_k = 1/0,12 = 8,33$ (adică de 8,33 ori curentul nominal).

Valoarea maximă a curentului de scurtcircuit instantaneu inclusiv componenta de curent continuu $I_{ks} = \sqrt{2} \cdot 1,8\, I''_k$ nu trebuie să depăşească mai mult de 15 ori amplitudinea curentului nominal; numai în cazul unui turbogenerator cu doi poli, de peste 25 MVA, se poate admite o valoare de 18 ori mai mare adică se cere ca

$$x''_d \geqslant 0,12 \text{ sau } x''_d \geqslant 0,1.$$

Curentul de scurtcircuit tranzitoriu

$$I'_k = \frac{U_1}{x'_d}.$$

Pentru curenţii de scurtcircuit la scurtcircuitele bifazate şi monofazate, v. tab. 7.4.

Diagrama fazorială pentru regimul staţionar şi tranzitoriu

E_0 este tensiunea electromotoare de mers în gol, depinzînd de curentul de excitaţie raportul i_e/i_{e0};

δ_0 este unghiul intern rotoric.

În diagrama fazorială pentru regimul staţionar (fig. 7.11) sarcina este

$$Z_{s0} = R_{s0} + jx_{s0},\quad \mathrm{tg}\,\varphi_0 = \frac{x_{s0}}{R_{s0}},\quad \mathrm{tg}\,\psi_0 = \frac{x_{s0} + x_q}{R_{s0}},$$

$$\delta_0 = \psi_0 - \varphi_0,\quad E_0 = U_1 \cos\delta_0 + I_1 x_d \sin(\delta_0 + \varphi_0).$$

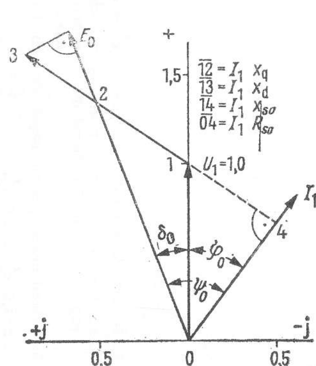


Fig. 7.11. Diagrama fazorială pentru regimul staţionar.

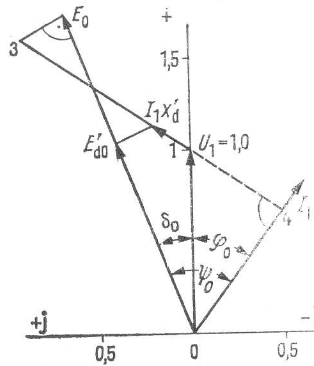


Fig. 7.12. Diagrama fazorială pentru regimul tranzitoriu.

Tensiunea electromotoare corespunzătoare regimului tranzitoriu E'_{d0} (fig. 7.12)

$$E'_{d0} = E_0 \frac{x'_d}{x_d} + U_1 \frac{x_d - x'_d}{x_d} \cos\delta_0.$$

Puterea activă şi critică, pentru regimul staţionar şi tranzitoriu P_a şi P_{cr}

Pentru regimul staţionar

$$P_a = \frac{E_0 U_1}{x_d} \sin\delta + \frac{U_1^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta.$$

Unghiul intern critic pentru regim staţionar (fig. 7.13) rezultă din ecuaţia

$$\frac{E_0}{U_1} \frac{x_q}{x_d - x_q} = \frac{\cos 2\delta_{cr}}{\cos\delta_{cr}}.$$

Pentru regimul tranzitoriu

$$P'_a = \frac{E'_{d0} U_1}{x'_d} \sin\delta + \frac{U_1^2}{2} \frac{x'_d - x_q}{x'_d x_q} \sin 2\delta.$$

Unghiul intern critic în regim tranzitoriu δ_{cr} rezultă din ecuaţia

$$\frac{E'_{d0}}{U_1} \frac{x_q}{x'_d - x_q} = -\frac{\cos 2\delta'_{cr}}{\cos\delta'_{cr}}.$$

Puterea de sincronizare la variaţii de sarcină foarte lente este

$$P_{sin} = \frac{E_0 U_1}{x_d} \cos\delta + U_1^2 \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \cos 2\delta,$$

iar la variaţii rapide de sarcină

$$P'_{sin} = \frac{E'_{d0} U_1}{x'_d} \cos\delta +$$

$$+ U_1^2 \frac{x'_d - x_q}{x'_d x_q} \cos 2\delta.$$

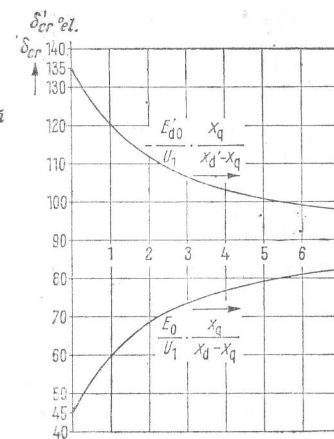


Fig. 7.13. Unghiurile critice pentru regimurile staţionar şi tranzitoriu (δ_{cr}, respectiv δ'_{cr}), pentru generatoare cu poli aparenţi.

În fig. 7.15 este reprezentat un exemplu de variație în regim staționar și dinamic a puterii active în cazul funcționării în paralel cu un sistem de putere infinită.

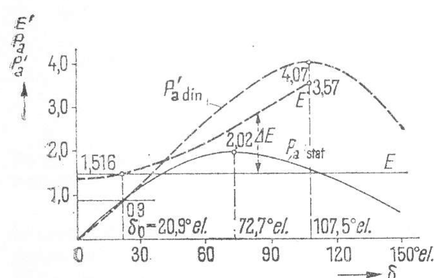


Fig. 7.14. Caracteristicile puterii active.
Exemplu de calcul a puterii active:

$$E' = E_0 + U_1 \frac{x_d - x'_d}{x'_d} (\cos \delta_0 - \cos \delta).$$

$U' = 1,0$
$I_1 = 0,9 - j\,0,436$
$x_d = 0,8$
$x_q = 0,52$
$x'_d = 0,3$

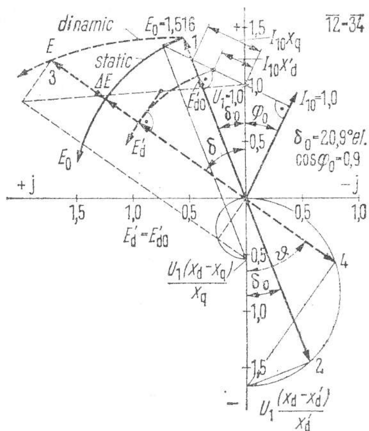


Fig. 7.15. Diagrama fazorială pentru o mașină sincronă care pendulează.

Curenții permanenți de scurtcircuit

trifazat	bifazat	monofazat
$I_{k\lambda} = \frac{U_1}{x_d}$	$I_{k\ell} = \frac{\sqrt{3}\,U_1}{x_d + x_2}$	$I_{k1} = \frac{3U_1}{x_d + x_2 + x_0}$

Exemplu:
Pentru $x_d = 1,0$; $x_2 = 0,18$; $x_0 = 0,10$; $U_1 = 1,0$, rezultă

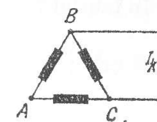
$$I_{k\lambda} = \frac{1,0}{1,0} = 1;$$

$$I_{k\ell} = \frac{\sqrt{3}}{1,0 + 0,18} = 1,47;$$

$$I_{k1} = \frac{3}{1,0 + 0,18 + 0,10} = 2,35.$$

Valori medii generale:

$$I_{k\lambda} : I_{k\ell} : I_{k1} = 1,0 : 1,5 : 2,5;$$



$$I_{k\Delta} = \frac{3U_1}{x_d + x_2 + x_0}.$$

(Scurtcircuit bifazat la borne pentru conexiuni în triunghi).

Deformarea tensiunii și supratensiunea ce apare la bornele fazei deschise în momentul unui scurtcircuit brusc (fig. 7.16 și 7.17).

$$\frac{U_{(t)}}{U_f} = \frac{\frac{x''_q}{x''_d}\sin\alpha}{\frac{x''_q}{x''_d}\cos^2\alpha + \sin^2\alpha} - \left(\frac{x''_q}{x''_d} - 1\right) \cdot \frac{\frac{x''_q}{x''_d}\sin\alpha\cos^2\alpha - \left(\frac{x''_q}{x''_d}\cos^2\alpha - \sin^2\alpha\right)\sin\delta_0}{\frac{x''_q}{x''_d}\cos^2\alpha + \sin^2\alpha};$$

$$\frac{U_{(t)max}}{U_f} = \left(2\frac{x''_q}{x''_d} - 1\right) \text{ pentru } \delta_0 = \frac{\pi}{2} \qquad \alpha = \delta_0 + \omega t.$$

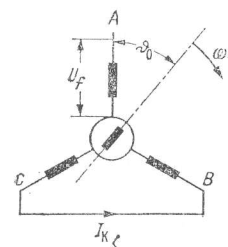


Fig. 7.16. Reprezentarea schematică a mașinii în cazul deformării tensiunii la un scurtcircuit brusc bifazat la borne:
U_f — tensiunea de fază înainte de scurtcircuit;
δ_0 — unghiul intern în momentul scurtcircuitului.

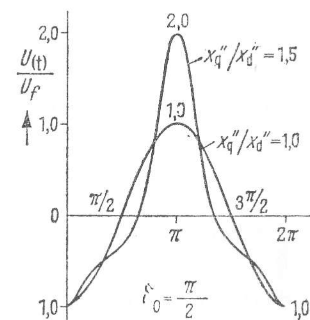


Fig. 7.17. Deformarea tensiunii și supratensiunea la bornele fazei deschise în timpul unui scurtcircuit brusc bifazat.

În tabelul 7.3 sînt date valori ale raportului $\frac{U_{(t)\,max}}{U_f}$ pentru diferite execuţii ale înfăşurării de amortizare la $\delta_0 = \frac{\pi}{2}$.

Tabelul 7.3. **Valori ale raportului $U_{(t)max}/U_f$ pentru diferite execuţii ale înfăşurării de amortizare la $\delta_0 = \frac{\pi}{2}$**

Execuţie	$\frac{x_q''}{x_d''}$	$\frac{U_{(t)max}}{U_f}$
Cu colivie completă de amortizare	0,9...1,2	0,8...1,4
Numai cu amortizare longitudinală şi cu poli laminaţi	2...3	3...5
Fără înfăşurare de amortizare, cu poli laminaţi	3...4	5...7
Cu piese polare masive	1,5...1,8	2...2,6

Şocuri de cuplu la scurtcircuit

La un scurtcircuit bifazat brusc la borne, neglijînd efectul înfăşurării de amortizare cuplul electromagnetic este egal cu

$$M_{p(t)} = \frac{U_1^2}{x_d''}\left(\sin \omega t - \frac{1}{2}\sin 2\omega t\right), \text{ (unităţi relative)}$$

M_p atinge valoarea maximă pentru $\omega t = \frac{2}{3}\pi$, astfel că:

$$M_{p\,max} = \frac{U_1^2}{x_d''}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}\,\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{3\sqrt{3}}{4}\,\frac{U_1^2}{x_d''} = 1{,}3\,\frac{U_1^2}{x_d''}.$$

Exemplu: Dacă $x_d'' = 0{,}15$ şi $U_1 = 1{,}0$ se obţine:

$$M_{p\,max} = 1{,}3 \cdot \frac{1}{0{,}15} = 8{,}66 \text{ ori cuplul nominal.}$$

La un scurtcircuit brusc trifazat cuplul de şoc se datorează numai componente continue, astfel că:

$$M_{p(t)} = \frac{U_1^2}{x_d''}\sin \omega t; \qquad M_{p\,max} = \frac{U_1^2}{x_d''},$$

$$M_{p\,max} = \frac{1}{0{,}15} = 6{,}66 \text{ ori cuplul nominal.}$$

7.1.3. Constantele de timp ale maşinilor sincrone

Constanta de timp la mers în gol T_{d0}' (în s)

Determină timpul de excitare şi demagnetizare a maşinii sincrone la mers în gol (fig. 7.18).

$$T_{d0}' = \frac{L_2}{r_2} = \frac{\Phi_{20} w_2 2p}{i_{e0} r_2}.$$

Din schema echivalentă rezultă de asemenea

$$T_{d0}' = \frac{L_2}{r_2} = \frac{x_a + x_{2\sigma}}{\omega r_2}.$$

În aceste relaţii:

Φ_{20} este fluxul total al rotorului la mers în gol, la tensiune nominală;
w_2 — numărul de spire pe pol;
$2p$ — numărul de poli;
i_{e0} — curentul de excitaţie la mers în gol, la tensiune nominală;
r_2 — rezistenţa circuitului de excitaţie;
L_2 — inductanţa circuitului de excitaţie.

Constanta de timp tranzitorie T_d'

Determină variaţia în timp a componentei $(I_K' - I_K)$ din curentul statoric în cazul unui scurtcircuit trifazat brusc la bornele maşinii (fig. 7.19).

$$T_d' = T_{d0}' \frac{x_d'}{x_d},$$

$$T_d' = \frac{L_{sc}}{r_2} = \frac{x_{2\sigma} + \dfrac{x_{1\sigma} x_a}{x_{1\sigma} + x_a}}{\omega r_2}.$$

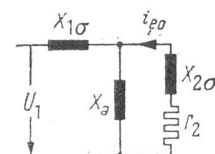


Fig. 7.18. Schema echivalentă a reactanţelor maşinii sincrone pentru determinarea constantei de timp T'_{d0} la mersul în gol.

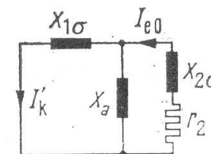


Fig. 7.19. Schema echivalentă a reactanţelor maşinii sincrone pentru determinarea constantei de timp tranzitorii T_d'.

Constanta de timp supratranzitorie T_d''

Determină variaţia în timp a componentei $(I_k'' - I_k')$ din curentul statoric în cazul unui scurtcircuit trifazat brusc.

$$T_d'' = T_{d0}'' \frac{x_d''}{x_d'} \approx \begin{cases} 0{,}01 \ldots 0{,}03 \text{ s pentru maşini mici şi medii;} \\ 0{,}03 \ldots 0{,}05 \text{ s pentru maşini mari peste 10 MVA.} \end{cases}$$

(T_{d0}'' este constanta de timp la mers în gol corespunzătoare înfăşurării de excitaţie şi de amortizare).

Constanta de timp T_a a componentei continue a curentului de scurtcircuit brusc

$$T_a = \frac{x_2}{\omega r_a},$$

unde:

r_a este reszistenţa înfăşurării statorului;
x_2 — reactanţa inversă.

Amplitudinea înfăşurătoarei componentei alternative a curentului de scurtcircuit brusc trifazat

$$I_{k(t)} = \sqrt{2}\left[(I_k'' - I_k')\, e^{-t/T_d''} + (I_k' - I_k)\, e^{-t/T_d'} + I_k\right].$$

Constanta de timp la funcţionarea în sarcină T_s'

În cazul funcţionării independente a maşinii pe o impedanţă de sarcină $Z_s = R_s + jx_s$ valoarea lui T_s' este:

$$T_s' = T_{d0}' \frac{R_s^2 + (x_s + x_q)(x_s + x_d')}{R_s^2 + (x_s + x_q)(x_s + x_d)}.$$

Pentru $Z_s = 0$ rezultă:

$$T_s' = T_{d0}' \frac{x_d'}{x_d} = T_d'.$$

La funcţionarea în paralel cu un sistem de putere infinită

$$T_s' \approx T_d' \approx T_{d0}' \frac{x_d' + x_v}{x_d + x_v},$$

unde x_v este reactanţa între maşină şi sistem.

În tabelul 7.4 se dau formulele pentru calcularea curenţilor, reactanţelor şi constantelor de timp în cazul unor scurtcircuite asimetrice.

Tabelul 7.4. **Curenţii de scurtcircuit şi constantele de timp la scurtcircuitele asimetrice**

Circuitul	I_k	I_k'	I_k''	T_d'	T_d''	T_a
	$\frac{U_1}{X_d}$	$\frac{U_1}{X_d'}$	$\frac{U_1}{X_d''}$	$T_{d0}' \frac{X_d'}{X_d}$	$T_{d0}'' \frac{X_d''}{X_d'}$	T_a
	$\frac{\sqrt{3}U_1}{X_d + X_2}$	$\frac{\sqrt{3}U_1}{X_d' + X_2}$	$\frac{\sqrt{3}U_1}{X_d'' + X_2}$	$T_{d0}' \frac{X_d' + X_2}{X_d + X_2}$	$T_{d0}'' \frac{X_d'' + X_2}{X_d' + X_2}$	T_a
	$\frac{3U_1}{X_d + X_2 + X_0}$	$\frac{3U_1}{X_d' + X_2 + X_0}$	$\frac{3U_1}{X_d'' + X_2 + X_0}$	$T_{d0}' \frac{X_d' + X_2 + X_0}{X_d + X_2 + X_0}$	$T_{d0}'' \frac{X_d'' + X_2 + X_0}{X_d' + X_2 + X_0}$	$T_a \frac{2X_2 + X_0}{3X_2}$
	$\frac{\sqrt{3}U_1}{X_d + X_2 + 2X}$	$\frac{\sqrt{3}U_1}{X_d' + X_2 + 2X}$	$\frac{\sqrt{3}U_1}{X_d'' + X_2 + 2X}$	$T_{d0}' \frac{X_d' + X_2 + 2X}{X_d + X_2 + 2X}$	$T_{d0}'' \frac{X_d'' + X_2 + 2X}{X_d'' + X_2 + 2X}$	
	$\frac{3U_1}{X_d + X_2 + X_0 + 3(X + X_e)}$	similar				

În cazul unui generator monofazat avem:

$$X_{de} = \frac{X_d + X_2}{\sqrt{3}}; \quad X_{de}' = \frac{X_d' + X_2}{\sqrt{3}}; \quad X_{de}'' = \frac{X_d'' + X_2}{\sqrt{3}},$$

$$I_k = \frac{U_1}{X_d}$$

$$I_k = \frac{3U_1}{X_d + X_2 + X_0}$$

dacă reactanţele individuale X_d, X_d' şi X_d'' se calculează ca pentru o maşină trifazată, cu acelaşi curent nominal şi cu aceeaşi tensiune între faze.

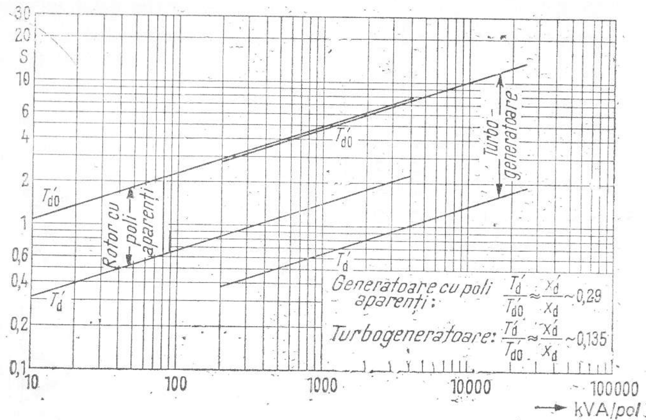


Fig. 7.20. Constantele de timp ale maşinii sincrone la funcţionarea în gol şi în scurtcircuit.

În fig. 7.20 sînt reprezentate constantele de timp medii pentru maşini sincrone întîlnite în practică.

7.1.4. Caracteristicile de tensiune ale maşinii sincrone

Reglarea automată a tensiunii

Fără reglare automată : La o variaţie bruscă a sarcinii, tensiunea electromotoare E'_{d0} (v. fig. 7.22), rămîne la început constantă. În fig. 7.22 este reprezentată diagrama fazională pentru regimul tranzitoriu în cazul unei sarcini iniţiale.

$$U_{10} = 1{,}0; \quad I_{10\,abs} = 1{,}0; \quad \underline{I}_{10} = 0{,}8 - \mathrm{j}\,0{,}6;$$

$$\underline{Z}_{s0} = 0{,}8 + \mathrm{j}\,0{,}6; \quad \varphi_0 = 36{,}87° \text{ (grade electrice)}; \quad \cos\varphi_0 = 0{,}8.$$

Caracteristicile generatorului sînt:

$$\frac{I_{k0}}{I_N} = 0{,}9; \quad x_{1\sigma} = 0{,}15;$$

$$x'_d = 0{,}25; \quad \frac{c_q}{c_d} = 0{,}5 \text{ (poli de cîmp sinusoidal } b/\tau \approx 0{,}75).$$

În acest caz:

$$x_d = \frac{1}{0{,}9} = 1{,}11; \quad x_a = x_d - x_{1\sigma} = 0{,}96;$$

$$x_q = \frac{c_q}{c_d}\,x_a + x_{1\sigma} = 0{,}63.$$

Unghiul intern δ_0 al rotorului la sarcina iniţială este dat de

$$\operatorname{tg}\delta_0 = \frac{I_{10}\,x_q\cos\varphi_0}{1 + x_q I_{10}\sin\varphi_0} = \frac{0{,}63\cdot 0{,}8}{1 + 0{,}63\cdot 0{,}6} = 0{,}365;$$

$$\delta_0 + \varphi_0 = 20{,}65° + 36{,}87° = 57{,}52° \text{ (electrice)};$$

$$E_0 = U_{10}\cos\delta_0 + I_{10}\,x_d\sin(\delta_0 + \varphi_0) = 1{,}869 \approx 1{,}87.$$

Tensiunea electromotoare tranzitorie este

$$E'_{d0} = E_0\,\frac{x'_d}{x_d} + U_{10}\,\frac{x_d - x'_d}{x_d}\cos\cdot\delta_0 = 1{,}15.$$

La o încărcare suplimentară bruscă cu un curent egal cu de două ori curentul nominal ($I_{1\,supl} = 2{,}0$) raportat la $U_{10} = 1{,}0$, $\cos\varphi = 0{,}3$, sarcina totală devine:

$$I_{1\,supl} = 2\,(0{,}3 - 0{,}954) = 0{,}6 - \mathrm{j}\,1{,}908 \qquad Z_s = (1{,}4 - \mathrm{j}\,2{,}508)^{-1}$$

$$I_{10} = 0{,}8 - \mathrm{j}\,0{,}6 \qquad = R_s + \mathrm{j}x_s$$

$$I_{1s} = 1{,}4 - \mathrm{j}\,2{,}508 \qquad = 0{,}17 + \mathrm{j}\,0{,}303.$$

Pentru $t = 0$, curentul statorului sare de la $I = 1{,}0$ la

$$I'_1 = E'_{d0}\,\frac{\sqrt{R_s^2 + (x_s + x_q)^2}}{R_s^2 + (x_s + x_q)(x_s + x'_d)} = 2{,}01.$$

Pentru $t = 0$, tensiunea scade brusc la U'_1. (Fenomenul supratranzitoriu, care durează aproximativ 0,03 ... 0,05 s, poate fi neglijat).

$$U'_1 = I'_1\sqrt{R_s^2 + x_s^2} = 2{,}01\sqrt{0{,}17^2 + 0{,}303^2} = 0{,}7.$$

În prima stare tranzitorie ($t = 0$, linia punctată în fig. 7.21), unghiul ψ între fazorul $\underline{E}_0$ şi curentul de sarcină $\underline{I}'_1$ este

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{x_s + x_q}{R_s} = \frac{0{,}303 + 0{,}63}{0{,}17} = 5{,}5;$$

$$\psi - \varphi = \delta = 79{,}7° - 60{,}72° = 18{,}98° \approx 19° \text{ (grade electrice)};$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_s}{R_s} = \frac{0{,}303}{0{,}17} = 1{,}783.$$

Tensiunea rotorului $E_0 = 1{,}87$ (corespunzătoare sarcinii iniţiale $I_{10} = 1{,}0$, $\cos\varphi = 0{,}8$) sare acum (excitaţia rămînînd constantă) la valoarea:

$$E' = E_0 + \frac{x_d - x'_d}{x'_d}\,(U_{10}\cos\delta_0 - U'_1\cos\delta) =$$

$$= 1{,}87 + 3{,}44\,(1{,}0\cdot 0{,}9415 - 0{,}7\cdot 0{,}9456) = 2{,}84.$$

Dacă nu se procedează la un reglaj al excitației, tensiunea rotorului E' scade în continuare pînă la valoarea inițială $E_0 = 1{,}87$, cu constanta de timp T'_s (v. pag. 364) în final stabilindu-se valoarea (linie-punct în fig. 7.21):

$$U_1 = U'_1 \frac{E_0}{E'} = 0{,}7 \frac{1{,}87}{2{,}84} = 0{,}46,$$

$$I_1 = I'_1 \frac{E_0}{E'} = 2{,}01 \frac{1{,}87}{2{,}84} = 1{,}32.$$

Tensiunea electromotoare corespunzătoare regimului tranzitoriu E'_{d0} scade la

$$E'_d = E'_{d0} \frac{I_1}{I'_1} = 1{,}15 \frac{1{,}32}{2{,}01} = 0{,}755.$$

În fig. 7.22 sînt reprezentate valorile corespunzătoare pornirii cu sarcină inițială nulă. Tensiunea electromotoare sare de la $E_0 = 1{,}0$ la $E' = 2{,}12$. Tensiunea la borne scade la $U'_1 = 0{,}69$, iar curentul tranzitoriu la $I'_1 = 1{,}36$; în final, aceste mărimi ajung la $U_1 = 0{,}33$ și $I_1 = 0{,}64$.

Cu regulator de tensiune: Tensiunea electromotoare tranzitorie care a crescut instantaneu la valoarea $E' = 2{,}84$ va scădea numai pînă la o valoare E'_{min} datorită intervenției regulatorului de tensiune. Spre sfîrșitul fenomenului tranzitoriu această tensiune electromotoare va reveni la o valoare normală.

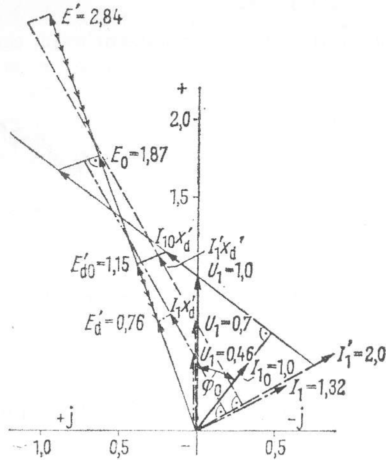


Fig. 7.21. Diagrama fazorială pentru regimul dinamic în cazul unei încărcări brușe pentru o sarcină inițială.
——— sarcina inițială;
- - - - - șoc de sarcină suplimentar, $t = 0$;
—·—· șoc de sarcină suplimentar, $t = \infty$.

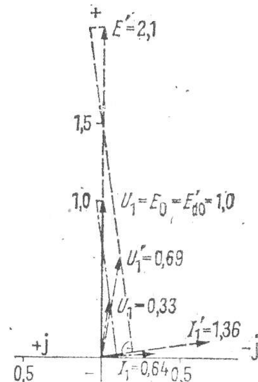


Fig. 7.22. Diagrama fazorială în regim dinamic pentru cazul fără sarcină inițială.

Eficiența reglării tensiunii este determinată de:

1) Viteza de excitație V, adică creșterea medie a tensiunii de excitație pe secundă, în comparație cu tensiunea de excitație la sarcina nominală a generatorului

$$V = \frac{d}{dt}\left(\frac{E}{E_N}\right).$$

Această valoare medie cuprinde eventualele întîrzieri care pot interveni în reglare.

2) Capacitatea de excitație E_{max}/E_N, adică raportul între tensiunea electromotoare de excitație maximă (E_{max}) ce poate fi atinsă și tensiunea electromotoare nominală.

3) Constantele de timp pentru mers în gol T'_{d0} respectiv în sarcină T'_s, ale generatorului.

Tabelul 7.5. Valori privind excitația

Viteza de excitație (valori medii) la:		Capacitatea de excitație E_{max}/E_N
Excitatoare cu autoexcitație	0,2...0,3	Generatoare cu capacitate de excitație standardizată ≈ 1,3
Excitatoare cu excitație independentă	0,8	
Dispozitive pentru forțarea excitației	1,2...1,5	Generatoare pentru condiții de stabilitate mărită ≈ 1,5...1,6
Excitație prin redresoare	> 5	Generatoare pentru sarcini reactive aplicate brusc ≈ 2,0

În exemplul precedent viteza de excitație a fost $V = 0{,}8$, capacitatea de excitație $E_{max}/E_N = 1{,}6$, sarcina inițială a fost egală cu sarcina nominală ($I_{10} = 1{,}0$ la $\cos\varphi = 0{,}8$), tensiunea electromotoare $E_0 = E_n = 1{,}87$ și constanta de timp la mers în gol $T'_{d0} = 2{,}5$ s; tensiunea E_0, care datorită creșterii brușe a sarcinii a sărit la E', scade valoarea:

$$E'_{min} = E_0 + VE_nT'_s \ln \frac{E' - E_0 + VE_NT'_s}{VE_NT'_s}.$$

Conform relației pentru funcționarea unui generator independent (v. sub „Constanta de timp la funcționarea în sarcină") avem

$$T'_s = T'_{d0} \frac{R_s^2 + (x_s + x_q)(x_s + x'_d)}{R_s^2 + (x_s + x_q)(x_s + x_d)} =$$

$$= 2{,}5 \frac{0{,}17^2 + (0{,}303 + 0{,}63)(0{,}303 + 0{,}25)}{0{,}17^2 + (0{,}303 + 0{,}63)(0{,}303 + 1{,}11)} = 1{,}01,$$

$$T'_s = 1{,}01 \text{s}.$$

$$E'_{min} = 1{,}87 + 0{,}8 \cdot 1{,}87 \cdot 1{,}01 \ln \frac{(2{,}84 - 1{,}87) + 0{,}8 \cdot 1{,}87 \cdot 1{,}01}{0{,}8 \cdot 1{,}87 \cdot 1{,}01};$$

$$E'_{min} = 2{,}62.\text{V}.$$

Totodată tensiunea $U_{10} = 1,0$, care iniţial a scăzut la valoarea $U_1' = 0,7$ scade mai departe la

$$U'_{1min} = U'_1 \frac{E'_{min}}{E'} = 0,7 \frac{2,62}{2,84} = 0,644;$$

$$U'_{1min} = 0,644 \text{ V};$$

apoi creşte din nou şi, asigurînd o capacitate de excitaţie $E_{max}/E_N = 1,6$, ajunge în sfîrşit la valoarea

$$U_1 = 0,7 \frac{1,6 \cdot 1,87}{2,84} = 0,74;$$

$$U_1 = 0,74 \text{ V}.$$

Curentul iniţial statoric $I_1' = 2,01$ scade la $I'_{1min} = 2,01 \frac{2,62}{2,84} = 1,85$ şi creşte pe urmă iarăşi la valoarea finală $I_1 = 2,01 \frac{1,6 \cdot 1,87}{2,84} = 2,14.$

Dacă generatorul a funcţionat iniţial în gol (fig. 7.23), valorile corespunzătoare sînt:

$$T_s' = 1,16\text{s}; \quad E'_{min} = 1,85 \quad \text{şi} \quad U'_{1min} = 0,69 \frac{1,85}{2,12} = 0,61.$$

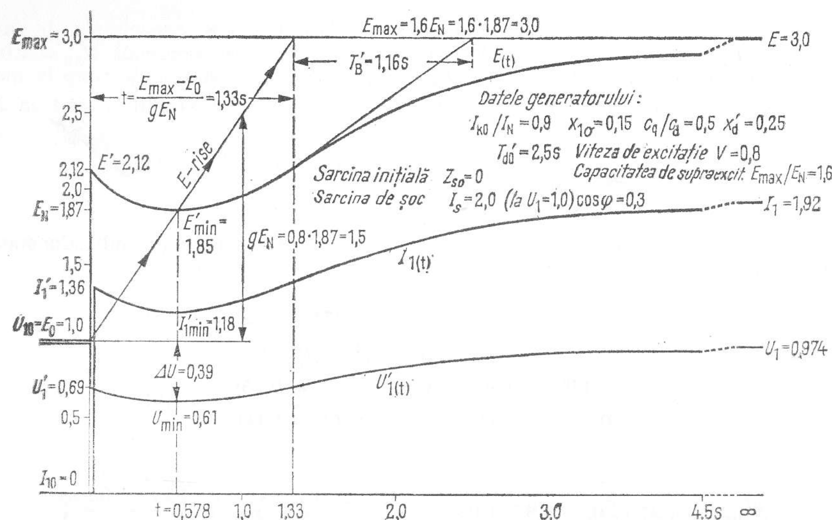


Fig. 7.23. Caracteristicile tensiunii electromotoare, tensiunii la borne şi curentului de sarcină, în funcţie de timp, pentru maşina cu regulator de tensiune, atunci cînd se aplică brusc o sarcină finită.

Curentul tranzitoriu I_1' scade de la

$$I_1' = 1,36$$

la

$$I'_{1min} = 1,36 \frac{1,85}{2,12} = 1,19.$$

Pe urmă, valorile cresc iarăşi şi anume:

$$U_1' \text{ la } U_1 = 0,69 \frac{1,6 \cdot 1,87}{2,12} = 0,974,$$

iar

$$I_1' \text{ la } I_1 = 1,36 \frac{1,6 \cdot 1,87}{2,12} = 1,92 \text{ A}.$$

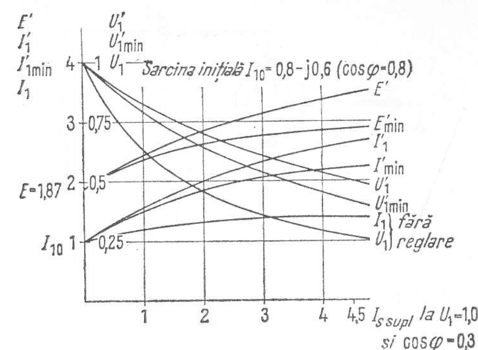


Fig. 7.24. Valori ale mărimilor electrice caracteristice ale unei maşini sincrone încărcate după aplicarea bruscă a unei sarcini.

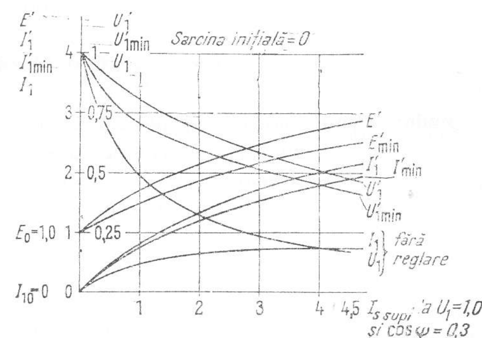


Fig. 7.25. Valori ale mărimilor electrice caracteristice ale unei maşini sincrone funcţionînd iniţial în gol, imediat după aplicarea bruscă a unei sarcini.

În fig. 7.24 şi 7.25 sînt reprezentate caracteristicile de tensiune şi curent pentru diferite sarcini adiţionale brusc introduse ($I_{s\,supl}$) la $\cos\varphi = 0,3$, atît pentru maşina iniţial încărcată, cît şi pentru maşina iniţial în gol:

— tensiunea electromotoare E', valoarea minimă a tensiunii la borne în timpul procesului tranzitoriu fără regulator U_1' sau cu regulator la tensiune $U'_{1\,min}$, curenţii corespunzători tranzitorii I_1', $I'_{1\,min}$, valorile finale stabilizate U_1, I_1 respectiv U_1' şi I_1'.

În fig. 7.23 sînt reprezentate caracteristicile tensiunii electromotoare E_1, tensiunii U_1 şi curentului I_1 la aplicarea unei sarcini bruşte ($I_s = 2,0$) după o funcţionare prealabilă în gol, maşina fiind prevăzută cu reglarea tensiunii ($V = 0,8$, $E_{max}/E_N = 1,6$).

7.2. MAŞINA DE CURENT CONTINUU

În diverse aplicaţii industriale poate fi utilizată ca generator (fig. 7.26, *a*) ca motor (fig. 7.26, *b*).

Pentru generator ecuaţia de funcţionare este

$$R_A I_A + \Delta U_p + U_A = E,$$

iar pentru motor

$$R_A I_A + \Delta U_p - U_A = E,$$

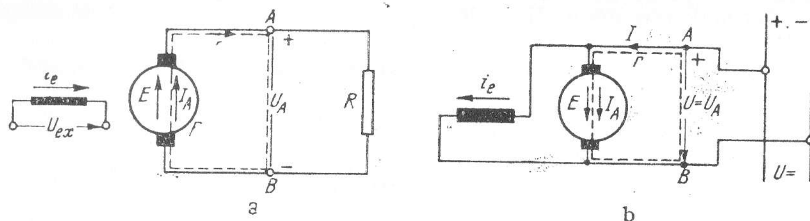


Fig. 7.26. Schema de principiu a mașinii de curent continuu: *a* — generator; *b* — motor.

unde: E este tensiunea electromotoare;
I_N — curentul nominal;
U_A — tensiunea la borne;
ΔU_p — căderea de tensiune la perii (1,5...3 V);
R_A — rezistența indusului.

Tensiunea electromotoare este dată de relația

$$E = \frac{pNn}{a}\Phi = K_e n\Phi, \qquad K_e = \frac{pN}{a},$$

unde: p este numărul de perechi de poli;
a — numărul de căi de curent;
N — numărul total de conductoare din crestături;
n — turația, în rotații pe secundă;
Φ — fluxul de excitație.

Puterea electromagnetică P este

$$P = M\Omega = EI_A = \frac{p}{a} N\Phi I_A n.$$

Cuplul electromagnetic, în N · m, este

$$M = \frac{p}{2\pi a} N\Phi I_A = K_m \Phi I_A, \quad \text{unde} \quad K_m = \frac{pN}{2\pi a}.$$

7.2.1. Generatorul de curent continuu

Tensiunea la borne este

$$U_A = E - R_A I_A - \Delta U_p = \frac{p}{a} Nn - R_A I_A - \Delta U_p.$$

Fluxul de excitație depinde de curentul de excitație prin caracteristica magnetică a mașinii și reprezintă curba de mers în gol. La mersul în gol tensiunea la

borne este egală cu tensiunea electromotoare. La mersul în sarcină tensiunea la borne scade cu cîteva procente (fig. 7.27, *a*).

La generatorul cu excitație derivație această scădere este și mai pronunțată, pentru ca la scurtcircuit tensiunea să fie egală cu zero (fig. 7.27, *b*). Pentru compensarea acestei căderi de tensiune se poate utiliza o înfășurare de excitație suplimentară serie (excitație compound) care să asigure o tensiune la borne aproximativ constantă (fig. 7.27, *c*).

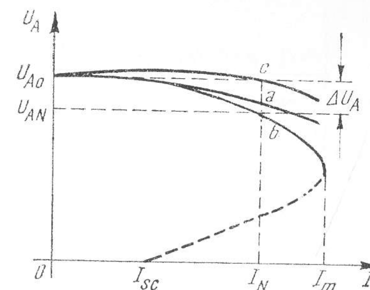


Fig. 7.27. Caracteristicile externe ale generatoarelor de curent continuu, cu excitație: *a* — separată; *b* — derivație; *c* — compound (mixtă).

7.2.2. Motorul de curent continuu

Se folosesc trei tipuri de excitație: separată, serie și mixtă. În funcție de aceste tipuri, caracteristica mecanică are formele din fig. 7.28.

Înglobînd căderea de tensiune la perii în rezistența indusului, turația n pentru mașina cu excitație separată are expresia:

$$n = \frac{U_A}{K_e\Phi} - \frac{R_A}{K_e K_m \Phi} \cdot M,$$

care reprezintă o dreaptă ușor căzătoare (fig. 7.28, *a*).

Pentru motorul serie în ipoteza unei caracteristici de mers în gol liniare, cuplul devine $M = KI_A^2$, iar caracteristica mecanică are expresia:

$$n = \frac{U_A - (R_A + R_e)K_1\sqrt{M}}{K_2\sqrt{M}},$$

în care: R_e este rezistența circuitului de excitație;
$K_1 = K_e K$;
$K_2 = K_m K$.

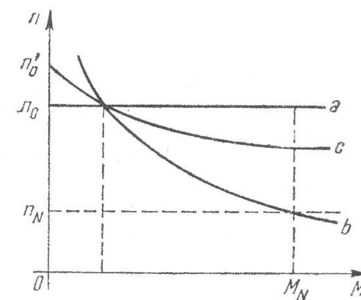


Fig. 7.28. Caracteristicile mecanice ale motoarelor de curent continuu cu excitație: *a* — derivație; *b* — serie; *c* — compound (mixtă).

Forma ei este aproximativ o hiperbolă (fig. 7.28, *b*).

Motorul cu excitație mixtă prezintă o caracteristică intermediară între aceste două extreme, avînd forma din fig. 7.28, *c*.

7.2.3. Pornirea, reglajul vitezei și frînarea

Curentul care parcurge indusul unei mașini de curent continuu este $I_A = \frac{U_A - E}{R_A}$.

Deoarece la pornire $E = 0$, mărimea curentului poate atinge valori periculoase. Curentul poate fi limitat fie micșorînd tensi-

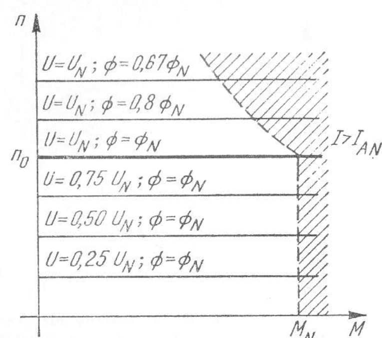


Fig. 7.29. Caracteristicile mecanice ale motorului de curent continuu la reglarea tensiunii şi excitaţiei.

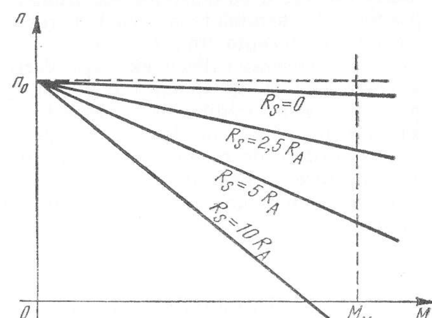
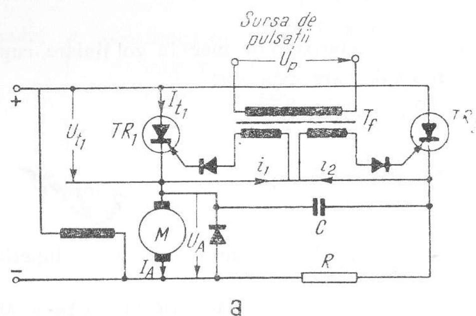


Fig. 7.30. Reglarea vitezei prin înserierea unor rezistenţe în circuitul rotorului.

unea la borne, fie introducînd în circuitul indusului o rezistenţă de pornire R_p de valoare

$$R_p = (1,3...1,5)\ \frac{U_A}{I_N}.$$



Reglarea vitezei motorului de curent continuu se poate efectua prin mai multe metode: reglarea curentului de excitaţie (fig. 7.29); introducerea de rezistenţe în circuitul rotoric (fig. 7.30); reglarea tensiunii la borne (fig. 7.29); reglarea prin impulsuri utilizînd instalaţii cu tiristoare (fig. 7.31).

Pentru frînare se pot utiliza trei metode (fig. 7.32):

1) funcţionarea în regim de generator cu recuperare, turaţia mai mare decît turaţia de mers în gol ($n > n_0$);

2) frînare dinamică; motorul funcţionînd în regim de generator debitează pe o rezistenţă de frînare;

Fig. 7.31. Reglarea vitezei unui motor de curent continuu cu ajutorul tiristoarelor: *a* — schema electrică; *b* — variaţia în timp a mărimilor funcţionale.

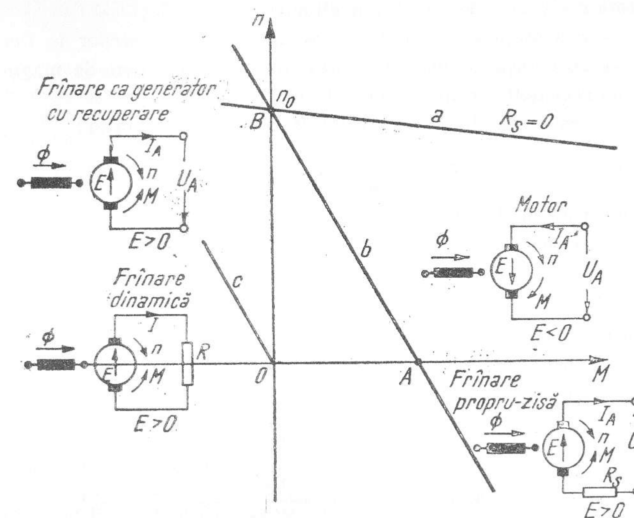


Fig. 7.32. Funcţionarea motorului de c. c. în regim de frînă.

3) frînare propriu-zisă, prin inversarea fie a polarităţii tensiunii la borne, fie a sensului de rotaţie, cuplul rezistent depăşind cuplul electromagnetic.

7.3. MAŞINA ASINCRONĂ

Motoarele asincrone se construiesc în două variante: cu inele de contact (rotorice), sau cu rotor în scurtcircuit. Pentru ambele tipuri este valabilă schema echivalentă din fig. 7.33, pe baza căreia se pot determina caracteristicile de funcţionare, unde:

U_1 este tensiunea de fază;
I_1 — curentul statoric;
I_2' — curentul raportat la stator;
I_{10} — curentul de mers în gol la sincronism;
R_1 — rezistenţa circuitului statoric;

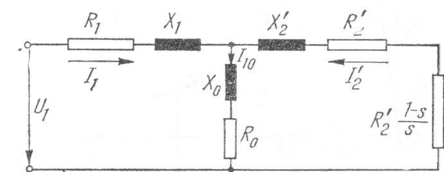


Fig. 7.33. Schema echivalentă în T a maşinii asincrone.

X_1 este reactanţa de scăpări a circuitului statoric;
R_0 — rezistenţa echivalentă corespunzătoare pierderilor în fier;
X_0 — reactanţa echivalentă corespunzătoare fluxului de magnetizare;
R_2' — rezistenţa rotorică raportată la stator;
X_2' — reactanţa de scăpări rotorică raportată la stator;
s — alunecarea: $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$;
n_1 — turaţia de sincronism, rot/min;
n_2 — turaţia reală;
$n_1 = \frac{60 f}{p}$,
unde: f este frecvenţa de alimentare;
p — numărul de perechi de poli;
Ω_1 — viteza unghiulară de sincronism.

Cuplul electromagnetic are valoarea

$$M = \frac{3R_2'U_1^2}{2\pi f\left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2\right]}.$$

În fig. 7.34 este reprezentată variaţia cuplului în funcţie de alunecare — caracteristica mecanică — cu următoarele notaţii:

M_m este cuplul maxim;
M_p — cuplul de pornire;
M_N — cuplul nominal;
s_m — alunecarea critică, corespunzătoare cuplului maxim;
s_N — alunecarea nominală.

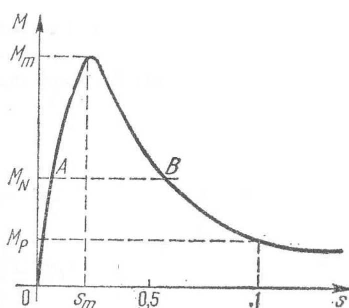


Fig. 7.34. Caracteristica mecanică $M = f(s)$ a motorului asincron cu inele.

Sub o formă simplificată, relaţia cuplului devine:

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}.$$

Alunecarea are expresia:

$$s_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}}.$$

7.3.1. Diagrama cercului

Caracteristicile maşinii asincrone se pot obţine, fie pe cale directă — încărcînd maşina — fie prin metode indirecte — grafice sau analitice. Se prezintă în cele ce urmează o metodă grafică, diagrama cercului, metodă bazată pe faptul că locul geometric al curentului rotoric la variaţia alunecării între $-\infty$ şi $+\infty$ este un cerc. Pentru trasarea unui cerc sînt necesare trei puncte. Primul se determină din încercarea de mers în gol, al doilea din încercarea de scurtcircuit la tensiune redusă, iar al treilea printr-o construcţie grafică ajutătoare. Maşina decuplată de orice altă instalaţie este alimentată la tensiunea nominală. Se măsoară curentul de mers în gol I_{10}, puterea la mers în gol P_0 şi cos φ_0. Se trasează fazorul curentului de mers în gol la o scară oarecare: 1mm $= aA$ (fig. 7.35). Deoarece maşina acoperă propriile pierderi mecanice, funcţionarea nu are loc la alunecarea nulă, iar A_0 nu reprezintă punctul de funcţionare la sincronism. P_g acoperă pierderile în fier P_{Fe} şi pe cele mecanice P_m; la maşinile asincrone P_{Fe} şi P_m sînt aproximativ egale: $P_0 = P_{Fe} + P_m \approx \approx 2P_{Fe}$. Din A_0 se duce o perpendiculară pe abscisă şi la jumătatea ei se găseşte punctul de funcţionare la sincronism A_μ. Prin acest punct se duce o paralelă la axa absciselor $A_\mu E$, dreapta pe care se va găsi centrul cercului. Fazorul OA_μ reprezintă curentul de mers la sincronism.

Pentru încercarea de scurtcircuit se calează maşina şi se alimentează cu o tensiune alternativă redusă, deoarece curentul de scurtcircuit I_{1k} nu trebuie să depăşească curentul nominal, pentru a nu distruge maşina.

Se măsoară tensiunea de alimentare U_{1k}, puterea de scurtcircuit P_{1k}, cos φ_{1k}. Pentru tensiunea nominală curentul de scurtcircuit se recalculează $I_{11} = I_{1k}\frac{U_{1N}}{U_{1k}}$; cos φ_{11} = cos φ_k. Neglijînd pierderile de magnetizare, puterea luată de la reţea acoperă pierderile în cuprul rotoric şi statoric:

$$P_{1k} = P_{Cu_1} + P_{Cu2} = 3(R_1 I_{1k}^2 + R_2' I_{2k}'^2) \approx 3I_{1k}''(R_1 + R_2')$$

şi deci, putem determina

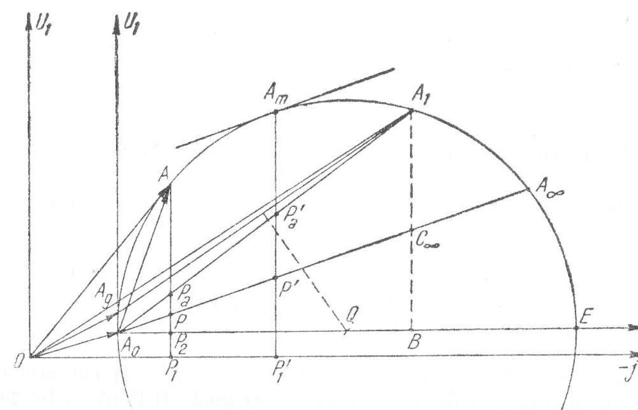


Fig. 7.35. Construcţia experimentală a diagramei cercului.

$R_1 + R_2' = \frac{P_{1k}}{3I_{1k}^2}$. Măsurînd printr-o metodă oarecare rezistenţa unei faze statorice, prin diferenţă se determină R_2'.

Dreapta $\overline{OA_1}$ de pe diagramă reprezintă curentul de scurtcircuit. Centrul cercului Q se obţine ducînd mediatoarea segmentului $\overline{A_0A_1}$; punctul Q se găseşte la intersecţia mediatoarei cu dreapta $\overline{A_\mu E}$. Punctul corespunzător alunecării infinite se determină coborînd din A_1 o ordonată $\overline{A_1B}$. Acest segment se împarte în raportul $\frac{\overline{A_1C_\infty}}{\overline{C_\infty B}} = \frac{R_2'}{R_1}$ şi se găseşte punctul C_∞. La intersecţia dreptei $\overline{A_\mu C_\infty}$ cu cercul se află punctul de funcţionare la alunecarea infinită, A_∞.

Dreapta $\overline{A_\mu A_1}$ reprezintă dreapta puterii mecanice, iar $\overline{A_0A_\infty}$ — dreapta puterii electromagnetice sau a cuplului.

Pentru un curent oarecare, de exemplu, $\overline{OA}$, perpendiculara $\overline{AP_1}$ la scara puterilor reprezintă puterea activă luată de reţea; $\overline{AP_a}$ — puterea mecanică; $\overline{AP}$ — puterea electromagnetică; $\overline{P_aP}$ — pierderile în cuprul rotoric P_{Cu2}; $\overline{PP_2}$ — pierderile în cuprul statoric P_{Cu_1}.

Scara puterilor: 1 mm = $3U_1a$ [W].

Alunecarea $s = \frac{P_{Cu2}}{P} = \frac{\overline{PP_a}}{\overline{AP}}$.

Cuplul $M = \frac{P}{\Omega_1}$ la scara: 1 mm = $\frac{3U_1a}{\Omega_1}$ [Nm].

Randamentul $\eta = \frac{P_a}{P_1} = \frac{\overline{AP_a}}{\overline{AP_1}}$.

Pentru determinarea cuplului maxim se trasează o paralelă la dreapta cuplurilor, tangentă la cerc. Punctul de tangenţă A_m corespunde cuplului maxim, segmentul $\overline{A_mP'}$ la scara cuplurilor reprezintă cuplul maxim.

Alunecarea maximă $s_m = \frac{P_{Cu2m}}{P_m} = \frac{\overline{P'P_a'}}{\overline{A_mP'}}$.

7.3.2. Pornirea, reglarea vitezei şi frînarea

Pornirea. Curentul statoric este aproximativ dat de relaţia

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2}};$$

În cazul pornirii prin cuplare directă la reţea ($s = 1$) curentul care străbate maşina poate fi periculos de mare. Valoarea sa poate fi limitată fie prin reducerea tensiunii (pornirea stea-triunghi, pornire cu autotransformator), fie introducînd în

serie cu statorul sau rotorul o serie de inductanţe sau rezistenţe de pornire. Pornirea stea-triunghi (fig. 7.36) este o metodă simplă de ponire pentru maşinile de mică putere. Scăderea tensiunii la borne are dezavantajul că şi cuplul de pornire scade proporţional cu pătratul tensiunii. Inductanţele suplimentare statorice sau rotorice, precum şi rezistenţa suplimentară statorică o dată cu scăderea curentului de pornire conduc şi la o scădere a cuplului.

Introducerea de rezistenţe suplimentare în circuitul rotoric are avantajul că pe lîngă o limitare a curentului de pornire conduce şi la o creştere a cuplului de pornire. Pentru $R_2' + R_{2supl}' = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}$ cuplul de pornire devine egal cu cuplul maxim $M_p = M_m$.

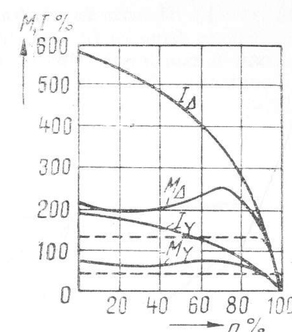


Fig. 7.36. Pornirea stea-triunghi a motorului asincron cu rotorul în scurtcircuit.

Reglarea vitezei. Viteza de rotaţie se reglează acţionînd fie asupra vitezei de sincronism $n_1 = \frac{60f}{p}$, fie asupra alunecării.

Astfel se folosesc următoarele metode:

Schimbarea numărului de poli. O metodă comodă care permite schimbarea în trepte fixe a vitezei de exemplu de la 3 000 rot/min la 1 500 rot/min. Se construiesc, în general, maşini cu două trepte — mai rar cu trei trepte de viteză.

Reglarea frecvenţei. În special, în ultimul timp utilizînd instalaţii cu tiristoare, această metodă a devenit convenabilă. Simultan cu frecvenţa se reglează şi tensiunea, astfel ca raportul $\frac{U_1}{f_1}$ să rămînă constant (fig. 7.37).

Reglarea vitezei prin introducerea unor rezistenţe suplimentare în circuitul rotoric (fig. 7.38) — reglarea alunecării — pe lîngă faptul că este destul de dificilă, are dezavantajul că maşina funcţionează cu un randament scăzut.

Frînarea maşinii asincrone se obţine prin trei metode:

a) *frînarea în regim de generator cu recuperare* (fig. 7.39, *a*);

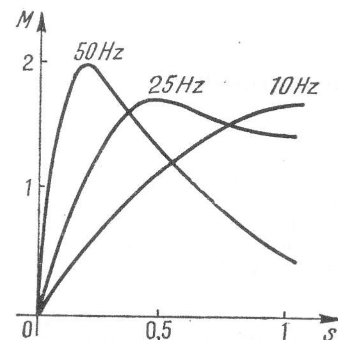


Fig. 7.37. Caracteristicile mecanice $M = f(s)$ pentru frecvenţă variabilă, la $\frac{U_1}{f_1}$ = const.

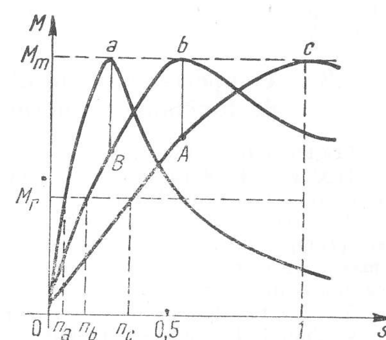


Fig. 7.38. Pornirea şi reglarea vitezei maşinii asincrone prin introducerea de rezistenţe rotorice suplimentare.

b) *frînarea în contracurent*, prin inversarea sensului de rotaţie (fig. 7.39,*b*);
c) *frînarea în curent continuu*; statorul decuplat de la reţea este alimentat în curent continuu; frînarea este asemănătoare celei dinamice de la maşina de curent continuu (fig. 7.39, *c*).

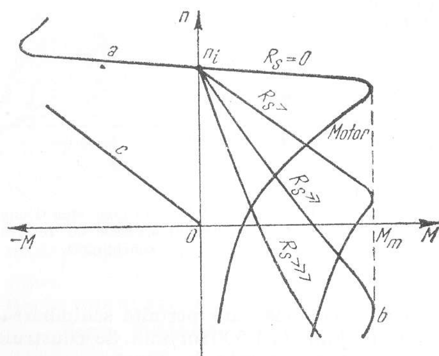


Fig. 7.39. Frînarea maşinilor asincrone: *a* — regim de generator cu recuperare; *b* — frînare propriu-zisă; *c* — frînare dinamică.

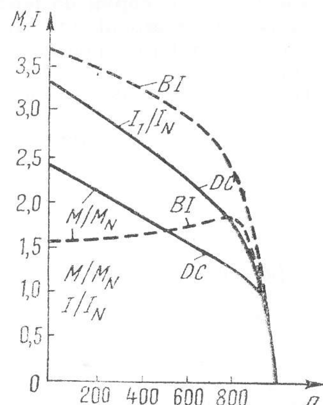


Fig. 7.40. Caracteristicile mecanice şi curenţii la alunecări variabile pentru motoarele cu dublă colivie (*DC*) şi cu bare înalte (*B*).

7.3.3. Tipuri speciale de motoare asincrone

Pentru uşurarea condiţiilor de pornire şi pentru obţinerea unor caracteristici speciale ale motoarelor în scurtcircuit s-au construit motoare cu dublă colivie şi motoare cu bare înalte. Ambele tipuri se bazează pe principiul efectului pelicular, la alunecări mari producîndu-se o refulare a curentului spre partea superioară a barelor rotorice şi deci creştere automată a rezistenţei coliviei. Caracteristicile electromecanice ale acestor maşini sînt prezentate în fig. 7.40.

7.3.4. Comportarea motorului asincron în condiţii de funcţionare anormală

Creşterea tensiunii (la putere constantă la arbore).

1) Curentul rotoric şi componenta curentului statoric care depinde de sarcină scad în raport aproape invers proporţional cu tensiunea.
2) Curentul de magnetizare, inducţia magnetică în întrefier şi pierderile de fier cresc. (Temperatura în fier creşte din cauza creşterii pierderilor în fier, iar curentul de magnetizare creşte rapid la motoarele cu fierul saturat; toate acestea limitează creşterea tensiunii).
3) Curentul de pornire creşte aproximativ în acelaşi raport ca şi tensiunea.
4) Cuplul de pornire şi cuplul de răsturnare cresc aproximativ proporţional cu pătratul tensiunii.
5) La aceeaşi putere debitată, factorul de putere descreşte, datorită curentului de magnetizare mărit şi datorită curentului activ mai mic.

6) Creşterea temperaturii în înfăşurările rotorului şi în general şi în cele ale statorului se reduce. Încălzirea totală a motorului depinde de faptul dacă predomină efectul încălzirii în fier sau în cupru. În general, pentru variaţiile de tensiune uzuale, încălzirea înfăşurărilor practic nu se schimbă.
7) Randamentul variază puţin, crescînd sau descrescînd în funcţie de variaţiile pierderilor în cupru, respectiv în fier.
8) Datorită pierderilor mai mici în rotor, turaţia va creşte uşor.

Scăderea tensiunii

1) Curentul statorului şi cel al rotorului cresc.
2) Curentul de magnetizare, inducţia magnetică în întrefier, pierderile în fier şi creşterea temperaturii în fier, scad.
3) Curentul de pornire scade aproximativ în aceeaşi proporţie.
4) Curentul de pornire şi cuplul de răsturnare scad aproximativ proporţional cu pătratul tensiunii.
5) Factorul de putere se îmbunătăţeşte.
6) Pierderile în cupru în rotor şi stator cresc. În general, temperatura creşte.
7) Randamentul este afectat numai într-o măsură neînsemnată.
8) Turaţia scade puţin.

În ambele cazuri, adică în cazul creşterii sau scăderii tensiunii, variaţia este limitată de creşterea temperaturii. La variaţii mai mari ale tensiunii, intervine în fier sau în înfăşurări o creştere inadmisibilă a temperaturii.

La variaţii ale tensiunii de circa $\pm$ 5% faţă de tensiunea nominală, maşina poate funcţiona la putere nominală.

Variaţia frecvenţei

Variaţia frecvenţei de alimentare are drept urmare o variaţie proporţională a turaţiei şi afectează caracteristicile de funcţionare ale motorului invers variaţiilor similare de tensiune. Puterea variază aproximativ proporţional cu frecvenţa, însă la frecvenţe mai mici, puterea scade mai mult decît proporţional, datorită înrăutăţirii condiţiilor de răcire.

7.4. PARAMETRII DE FUNCŢIONARE AI MOTOARELOR ELECTRICE

Notaţii:

P — puterea activă, în kW;
P_M — puterea mecanică la ax, în kW;
η — randamentul, în %;
I — curentul absorbit de la reţea (curentul statorului pentru motoare de c.a.), în A;
S — puterea aparentă, în kVA;
Q — puterea reactivă, în kvar;
U — tensiunea reţelei, în V;
$\cos\varphi$ — factorul de putere.

Puterea electrică absorbită din reţea de un motor de c.c.:

$$P = \frac{P_M \cdot 100}{\eta}.$$

Curentul absorbit:

$$I = \frac{P_M \cdot 1000 \cdot 100}{U\eta}.$$

Pentru motoarele asincrone trifazate:

puterea activă absorbită de reţea: $$P = \frac{P_M \cdot 100}{\eta};$$

puterea aparentă absorbită: $$S = \frac{P_M \cdot 100}{\eta \cos\varphi};$$

sau $$S = \frac{\sqrt{3}UI}{1000};$$

puterea reactivă absorbită: $$Q = \frac{P_M \operatorname{tg}\varphi \cdot 100}{\eta};$$

curentul absorbit $$I = \frac{P \cdot 1000}{\sqrt{3}\, U \cos\varphi};$$

sau $$I = \frac{P_M \cdot 1000 \cdot 100}{\sqrt{3}\, U\eta \cos\varphi}.$$

Formula aproximativă la 380 V: $I \approx 2{,}2P_M$.

Tabelul 7.6. Randamentul şi factorul de putere pentru motoare de joasă tensiune

Turaţia motorului 1500 rot/min		Randamentul η %	Factorul de putere $\cos\varphi$
Motoare de c. c.	1...10 kW	70...84	—
	pînă la 100 kW	84...92	—
	pînă la 1000 kW	92...95	—
Motoare de c. a. cu inele de contact	11...100 kW	86...93	0,79...0,87
	pînă la 500 kW	93 .95	0,87...0,91
Motoare de c. a. cu rotorul în scurtcircuit	sub 1 kW	53 ..74	0,67...0,78
	pînă la 11 kW	74...88	0,81...0,85
	pînă la 132 kW	88...95	0,86...0,88
	pînă la 400 kW	95...97	0,88. .0,89

Randamentul şi factorul de putere al motoarelor asincrone variază în funcţie de sarcină (v. tabelul 7.7).

În fig. 7.43 este reprezentată grafic relaţia între puterile activă, reactivă şi aparentă. Mărimile necunoscute pot fi uşor determinate din această diagramă.

Tabelul 7.7. Randamentul şi factorul de putere pentru motoare asincrone

Randamentul, în %, la diverse sarcini				Randamentul, în %, la diverse sarcini			
1/2	3/4	4/4	5/4	1/2	3/4	4/4	5/4
din sarcina nominală				din sarcina nominală			
93,5	95	95	94,5	70	73	73	71
92,5	94	94	93,5	68	72	72	70
91,5	93	93	92,5	67	71	71	69
91	92	92	91,5	66	70	70	68
90	91	91	90	65	69	69	67
89	90	90	89	64	67,5	68	66
88	89	89	88	62	66,5	67	65
87	88	88	87	61	65	66	64
86	87	87	86	60	64	65	63
85	86	86	85	59	63	64	62
84	85	85	83,5	57	62	63	61
83	84	84	82,5	56	60,5	62	60,5
82	83	83	81,5	55	59,5	61	59,5
81	82	82	80,5	54	58,5	60	58,5
80	81	81	79,5	53	58	59	57
79	80	80	78,5	52	57	58	56
77	79,5	79	77,5	51	55	57	55
75,5	78,5	78	76,5	49	54	56	54
74	77,5	77	75	47	52	55	53
73	76	76	74	46	51	54	52
72	75	75	73	45	50	53	51
71	74	74	72				
Factorul de putere la diverse sarcini				Factorul de putere la diverse sarcini			
1/2	3/4	4/4	5/4	1/2	3/4	4/4	5/4
din sarcina nominală				din sarcina nominală			
0,83	0,88	0,90	0,90	0,65	0,75	0,80	0,81
0,80	0,86	0,89	0,89	0,63	0,74	0,79	0,80
0,78	0,85	0,88	0,88	0,61	0,72	0,78	0,80
0,76	0,84	0,87	0,87	0,59	0,71	0,77	0,79
0,75	0,83	0,86	0,86	0,58	0,70	0,76	0,78
0,73	0,81	0,85	0,86	0,56	0,69	0,75	0,78
0,71	0,80	0,84	0,85	0,55	0,68	0,74	0,77
0,69	0,79	0,83	0,84	0,54	0,67	0,73	0,76
0,67	0,77	0,82	0,83	0,52	0,63	0,72	0,77
0,66	0,76	0,81	0,82	0,50	0,62	0,71	0,76

În fig. 7.41 şi 7.42 sînt reprezentate valorile aproximative pentru randamentul şi factorul de putere, în funcţie de puterea nominală, la motoarele asincrone.

Dacă pentru compensarea puterii reactive absorbită de un motor asincron se foloseşte un condensator, legat direct la bornele motorului, este necesar să fie compensată numai circa 90% din puterea reactivă la mers în gol (v. tabelele 7.8 şi 7.9).

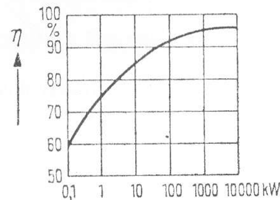


Fig. 7.41. Randamentul mașinii asincrone funcție de puterea nominală.

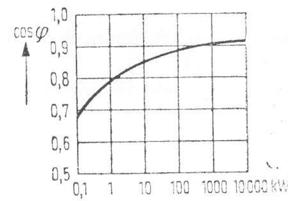


Fig. 7.42. Factorul de putere al mașinii asincrone funcție de puterea nominală.

Exemplu: Un motor trifazat de putere nominală $P = 6{,}3$ kW, randament $\eta = 84\%$, $\cos\varphi = 0{,}83$, absoarbe din rețea $P_W = 7{,}5$ kW putere activă, $S = 9$ kVA putere aparentă și $Q = 5$ kvar putere reactivă.

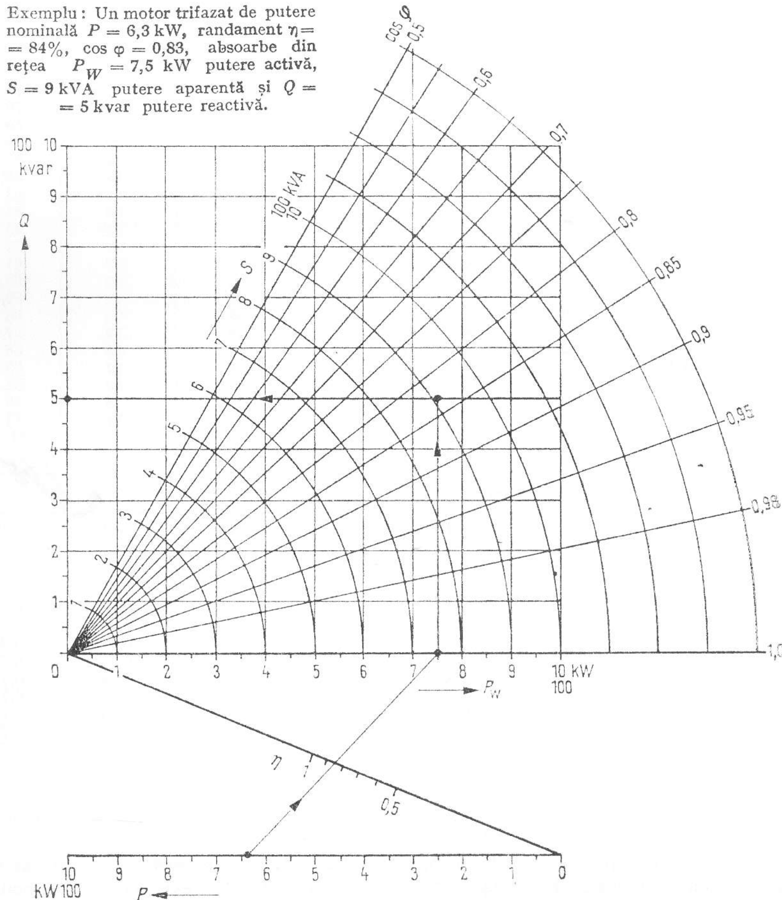


Fig. 7.43. Relația între puterea activă, reactivă și aparentă.

Tabelul 7.8. Puterea reactivă necesară pentru compensarea motoarelor asincrone trifazate

Puterea nominală a motorului kW ..	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	peste 30
Puterea nominală a condensatoarelor kVar	2	2,5	3	5	6	8	10	aproximativ 35% din puterea nominală a motorului

Tabelul 7.9. Curentul aproximativ în A, pentru 1 kW de putere nominală, pentru motoare cu turație de 1 500 rot/min

Puterea nominală		c.c.		c.a.		
kW	CP	220 V	440 V	220 V	380 V	500 V
0,75	1	6,4	3,2	5,3	3	2,3
1,1... 1,5	1,5... 2	6,2	3,1	4,4	2,5	2,0
2,2... 7,5	3 ... 10	5,5	2,8	4,0	2,25	1,6
11 ... 22	15 ... 30	5,3	2,7	3,5	2,0	1,5
30 ... 75	40 ...100	5,2	2,6	3,3	1,9	1,4
90...315	125 ...420	5,1	2,6	3,1	1,8	1,35

7.5. ACȚIONĂRI ELECTRICE

7.5.1. Caracteristicile mecanice

Pentru predeterminarea proceselor de pornire și de frînare, precum și pentru alegerea unor mașini cu turație reglabilă, este necesară cunoașterea caracteristicilor mecanice ale instalațiilor acționate (cuplul funcție de turație).

În fig. 7.44 și 7.45 sînt reprezentate cele patru forme principale ale caracteristicii cuplului, respectiv ale puterii. Aceste caracteristici se referă la următoarele cazuri principale de aplicații:

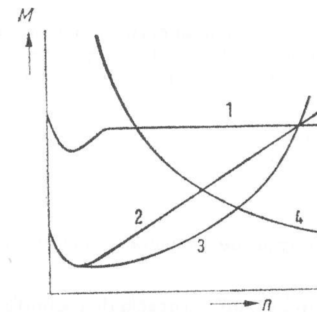


Fig. 7.44. Cuplu funcție de turație.

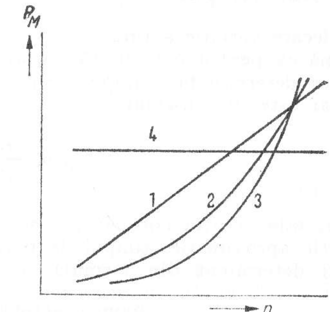


Fig. 7.45. Puterea P_M funcție de turație.

1) Cuplul de sarcină practic constant, puterea direct proporţională cu turaţia Acesta este cazul, de exemplu, pentru: macarale, pompe şi compresoare cu piston în cazul refulării la presiune constantă, suflante cu rotoare angrenate, laminoare, benzi transportoare, mori fără ventilatoare, maşini-unelte cu forţa de aşchiere constantă.

2) Cuplul de sarcină creşte proporţional cu turaţia, puterea este proporţională cu pătratul turaţiei, de exemplu, cazul calandrelor.

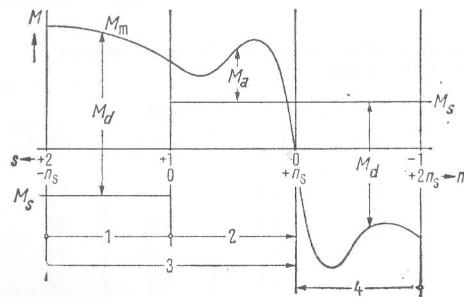


Fig. 7.46. Pornirea, frînarea şi inversarea sensului de rotaţie a motoarelor cu rotorul în scurtcircuit: $M_a = M_m - M_s$; M_m — cuplu motor; M_s — cuplul de sarcină; M_a — cuplu de accelerare; M_d — cuplul de decelerare; *1* — frînarea în contracurent; *2* — pornirea; *3* — inversarea; *4* — frînarea recuperativă.

3) Cuplul de sarcină creşte proporţional cu pătratul turaţiei, iar puterea proporţional cu puterea a treia a turaţiei. Acesta este cazul pompelor centrifuge, ventilatoarelor şi maşinilor cu piston care refulează într-un sistem deschis de conducte.

4) Cuplul de sarcină scade invers proporţional cu turaţia, puterea este constantă. Acesta este cazul întîlnit cîteodată la strunguri şi alte maşini-unelte similare, la maşini, de derulat furnir sau la acţionări cu reglarea mecanică a turaţiei.

Compararea caracteristici cuplului maşinii acţionate cu cea a cuplului motorului permite determinarea comportării maşinii electrice în timpul funcţionării. La pornire, respectiv la frînare, diferenţa între aceste două cupluri reprezintă cuplul motor de accelerare M_a, respectiv de decelerare M_d.

Această situaţie este exemplificată în fig. 7.46 pentru un motor cu rotorul în scurtcircuit, în funcţie de turaţia n şi de alunecarea s.

7.5.2. Timpul de pornire

Fiecare variaţie a turaţiei este asociată unei variaţii a energiei cinetice; aceasta înseamnă că pentru o anumită variaţie a turaţiei pe unitatea de timp este necesară o putere determinată. Timpul de pornire t_p de la starea de repaus pînă la regimul staţionar este în consecinţă

$$t_p = \frac{GD^2}{375} \int_{n_1=0}^{n_2} \frac{1}{M_a}\, dn$$

unde n_2 este turaţia normală (v. pag. 30)

Prin aproximaţie, timpul de pornire la un cuplu de accelerare mediu constant poate fi determinat din formula (v. şi fig. 7.51):

$$\text{Timpul de pornire(în s)} = \frac{\text{momentul total de volant (în kgf. m}^2) \times \text{turaţia de regim(în rot/min)}}{375 \times \text{cuplul mediu de accelerare (în kgfm)}}.$$

În timpul pornirii şi în timpul funcţionării intervine, datorită pierderilor, o creştere a temperaturii pînă ce se ajunge la temperatura normală de regim. După un anumit timp de funcţionare continuă t se ajunge la temperatura finală θ_E.

$$t \approx 3...4T_\theta.$$

unde T_θ este constanta de timp a încălzirii.

În fig. 7.47 este reprezentată caracteristica creşterii de temperatură. Din punct de vedere practic şi economic temperatura finală trebuie să coincidă pe cît posibil cu

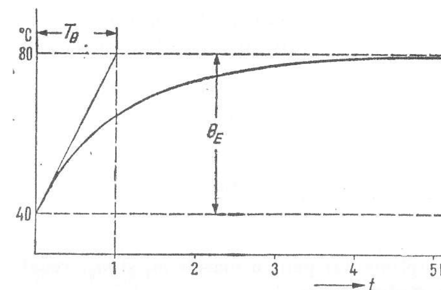


Fig. 7.47. Creşterea în timp a temperaturii părţilor componente ale unui motor care funcţionează cu pierderi constante.

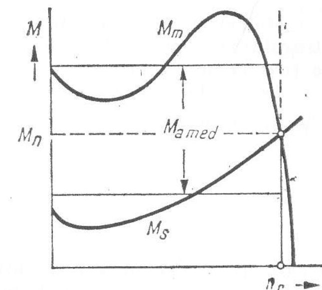


Fig. 7.48. Determinarea cuplului mediu de accelerare: M_m — cuplul motorului; M_s — cuplu de sarcină; M_{amed} — cuplu mediu de accelerare; n_r — turaţia de regim.

temperatura limită, stabilită prin regulamentele în vigoare (v. tabelul 6. 3 p. 337).

În regim staţionar, cuplul motor este egal cu cuplul de sarcină

$$M_m = M_s.$$

Dacă motorul de acţionare este ales în mod corect, puterea nominală la funcţionare în regim staţionar trebuie să corespundă puterii de acţionare a maşinii de lucru. Prescripţiile nu prevăd o depăşire permanentă a cuplului.

Timpul de pornire t_p(în s) pentru un motor se poate determina cunoscînd valoarea medie a cuplului motorului a cuplului de sarcină, şi momentul de volant al maşinii şi instalaţiei acţionate:

$$t_p = \frac{\pi n_m}{30 \cdot 4\, g} \frac{GD^2}{M_a} = \frac{1}{375} \frac{n_m GD^2}{M_a},$$

unde: n_m este turaţia nominală a motorului, în rot/min;

GD^2 — momentul de volant total în kgf.m²; el este dat de: $GD^2 = 4\, gj = GD^2$ (motor) $+ GD^2$(maşina acţionată);

J — momentul de inerţie, în kgf.s². m; $J = m \frac{D^2}{4}$ şi $m = \frac{G}{g}$;

M_a — cuplul de accelerare, în kgf.m; el este dat de $M_a = M_m - M_s$;

g — acceleraţia gravitaţiei: $g = 9{,}81$ m/s².

În fig. 7.48 este reprezentat grafic cuplul mediu de accelerare.

Momentul de volant GD^2 în kgf.m pentru corpuri cilindrice goale se determină din formula

$$GD^2 = 393\gamma\, L(d_e^4 - d_i^4),$$

în care: d_e este diametrul exterior, în m;
d_i — diametrul interior, în m (pentru cilindrii plini $d_i = 0$);
L — lungimea cilindrului, în m;
ρ — densitatea, în g/cm³.

Momentul de volant total se poate calcula din suma momentelor individuale ale întregului grup de maşini, inclusiv motorul, fiecare moment urmînd a fi recalculat pentru turaţia motorului.

Recalcularea momentelor de volant ale maşinii acţionate GD_s^2, avînd turaţiile n_1 şi n_2, la turaţia motorului n_m se poate efectua folosind formula următoare:

$$GD_s^2 = \frac{n_1^2}{n_m^2} m_1 + \frac{n_2^2}{n_m^2} m_2; \; m_1 = G_1D_1^2, \; m_2 = G_2D_2^2,$$

în care: GD_s^2 reprezintă momentul de volant suplimentar pentru masele m_1 şi m_2, recalculat pentru turaţia motorului n_m;
n_1, n_2, — turaţiile maselor m_1 şi m_2.

Conform fig. 7.49, momentele de volant ale maselor accelerate la turaţia n_1, n_2, trebuie reduse la turaţia axului motorului;

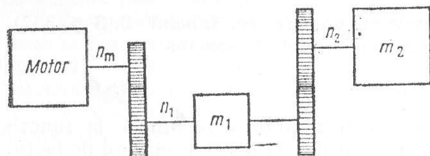


Fig. 7.49. Motor şi maşină acţionată, avînd turaţii diferite.

$$t_p = \frac{1}{375} \frac{n_m GD_{red}^2}{M_a},$$

$$GD_{red}^2 = G_mD_m^2 + G_1D_1^2 \frac{n_1^2}{n_m^2} + G_2D_2^2 \frac{n_2^2}{n_m^2} \ldots,$$

unde: $G_mD_m^2$ este momentul de volant al motorului, în kgf m²;
$G_1D_1^2$. $G_2D_2^2$ sînt momentele de volant ale maselor m_1, m_2,..., în kgf. m².

În cazul unor mase se deplasează în linie dreaptă, ca de exemplu la acţionări pentru mese sau cărucioare, momentul de volant, raportat la turaţia axului motorului este:

$$(GD_s^2)_{nm} = 365 \frac{Gv^2}{n_m^2},$$

unde: GD_s^2 este momentul de volant în kgf·m² (v. pag. 11) raportat la turaţia axului motorului,
G — sarcina, în kgf;
v — viteza, în m/s;
n_m — turaţia motorului, în rot/min.

Observaţii la nomograma fig. 7.50.

1. Se uneşte momentul de volant dat, de exemplu $GD^2 = 0{,}1$ kgf · m², şi turaţia asociată $n = 500$ rot/min; punctul de intersecţie cu scara de mijloc se uneşte cu punctele reprezentînd turaţiile motorului $n = 1\,000$, $1\,500$ sau $3\,000$ rot/min, prelungindu-se pînă la intersecţia cu scara GD^2; momentul de volant raportat la turaţia motorului este de 0,025 kgf. m² la 1 000 rot/min, 0,011 kgf·m² la 1 500 rot/min, 0,0028 kgf.m² la 3 000 rot/min.

2. Se uneşte greutatea masei, de exemplu $G = 5\,000$ kgf cu viteza $v = 0{,}5$ m/s; punctul de intersecţie cu scara din mijloc se uneşte cu turaţia motorului $n = 1\,000$ rot/min şi se prelungeşte pînă la intersecţia cu scara GD^2; momentul de volant raportat la turaţia motorului este de 0,45 kgf·m².

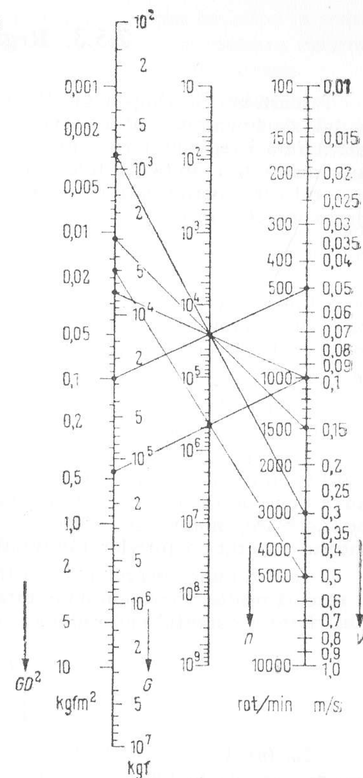


Fig. 7.50. Nomogramă pentru convertirea momentelor de volant.

Din fig. 7.51 se poate deduce timpul de pornire în gol pentru motoare cu rotorul în scurtcircuit (fără alte mase inerţiale cuplate cu maşina).

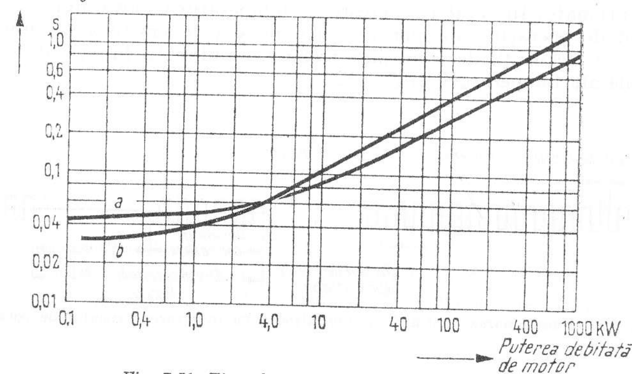


Fig. 7.51. Timpul de pornire la mersul în gol:
a — motor cu răcire interioară; b — motoare cu răcire prin ventilare exterioară.

7.5.3. Regimurile de funcţionare

Constanta de timp a încălzirii T_θ are o importanţă deosebită în aprecierea regimului de funcţionare al unei maşini electrice. Se consideră *regim de funcţionare de scurtă durată* regimul în care un motor este deconectat de la reţea după un timp de funcţionare t_f, înainte ca diversele părţi ale sale să fi ajuns la o temperatură stabilă, motorul fiind pornit din nou abia după o pauză care permite ca maşina să revină la starea practic rece

$$t_f < 3T_\theta.$$

Constanta de timp a răcirii în stare de repaus $T_{\theta st}$, cînd ventilatorul, montat pe axul motorului, nu mai funcţionează, este mai mare decît constanta de timp de încălzire în timpul funcţionării raportul fiind : $T_{\theta st} \approx 2T_\theta$ pentru motoare răcite în interior; $T_{\theta st} \approx 1{,}4 \ldots 2{,}0\ T_\theta$ pentru motoare cu răcire prin ventilare exterioară.

Timpul de funcţionare t_f trebuie limitat astfel ca temperatura la care ajunge motorul să fie sub valoarea limită admisibilă (v. tab. 6.3).

Funcţionarea continuă cu sarcină intermitentă este similară cu funcţionarea de scurtă durată, deoarece timpul în care se aplică sarcina este aşa de scurt, încît motorul nu ajunge la temperatura de regim staţionar. În timpul repausului dintre perioadele de încărcare, motorul se răceşte practic la temperatura lui finală la mers în gol, ventilatorul montat în interior rămînînd în funcţiune.

În cazul unei încărcări de scurtă durată, cu sarcină variabilă, se consideră în general o sarcină medie. Presupunînd o durată suficient de scurtă a unui ciclu şi o dependenţă liniară între curentul motorului şi sarcină, sarcina medie poate fi calculată din formula:

$$P_{med} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}.$$

La funcţionarea în regim intermitent timpii de încărcare alternează cu timpii de oprire, fără ca motorul să se poată răci la temperatura agentului de răcire. Puterea nominală a motorului se determină în funcţie de valorile standardizate de 20, 40 sau 60% pentru durata relativă de conectare.

Funcţionarea cu conectări repetate constituie o variantă a regimurilor de funcţionare susmenţionate; în acest caz, creşterea temperaturii motorului este determinată în primul rînd de operaţiile de pornire, frînare sau inversare a sensului de rotaţie, puterea limită şi frecvenţa de conectare trebuie stabilite în funcţie de creşterile maxime admisibile ale temperaturii (fig. 7.52).

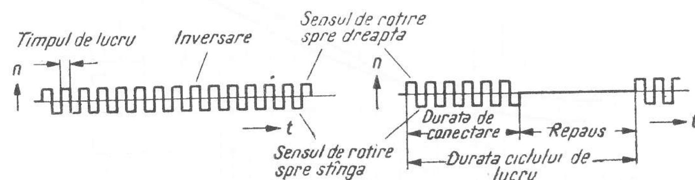


Fig. 7.52. Funcţionarea continuă şi intermitentă cu inversarea sensului de rotaţie.

Dacă pentru un anumit motor, de exemplu un motor asincron cu rotor în scurtcircuit este cunoscută frecvenţa de conectare, se poate determina puterea maximă admisibilă şi frecvenţa de conectare pentru celelalte regimuri de funcţionare.

Dacă la un motor cu un moment de volant $(GD^2)_m$ în kgf. m², mergînd în gol în regim de funcţionare continuu fără să fie cuplat cu mase suplimentare inerţiale, se inversează sensul de rotaţie, frecvenţa de conectare la care motorul ajunge, în condiţii de regim staţionar, la temperatura maximă admisibilă, se numeşte frecvenţa de conectare la mers în gol Z_0; ea se exprimă prin numărul de inversări pe oră.

În tabelul 7.10 se dau momentele de volant şi frecvenţele de conectare la mers în gol Z_0 pentru cîteva tipuri de motoare asincrone trifazate, cu răcire prin ventilare exterioară, în funcţie de puterea lor nominală.

Tabelul 7.10. Puterea nominală, momentul de volant şi frecvenţa de conectări la mers în gol a motoarelor

Puterea nominală kW	Motor GD² kgf. m²	Frecvenţa de conectări la mers în gol, Z_0, inversări/h	Puterea nominală kW	Motor GD² kgf. m²	Frecvenţa de conectări la mers în gol, Z_0, inversări/h
0,12	0,0014	4000	3	0,0234	2500
0,18	0,0016	4000	4	0,0439	2000
0,25	0,0024	3500	5,5	0,085	1400
0,37	0,0033	3500	7,5	0,105	1200
0,55	0,0061	3000	11	0,205	1100
0,75	0,0072	3000	15	0,24	600
1,1	0,0109	3500	18,5	0,59	300
1,5	0,0143	3000	22	0,65	300
2,2	0,0207	2800	30	1,2	240

În ce priveşte solicitarea motoarelor, în special a motoarelor cu rotor în scurtcircuit, funcţionînd în regim cu conectări repetate, prezintă o importanţă deosebită următorii factori: mărimea maselor suplimentare inerţiale cuplate cu motorul, sarcina motorului la pornire şi frînarea electrică. În tabelul 7.11 se dau formulele şi factorii de convertire pentru determinarea frecvenţei admisibile de conectare în funcţie de condiţiile de funcţionare date şi de frecvenţa de conectare la mers în gol.

Tabelul 7.11. Frecvenţa de conectare în timpul funcţionării Z_f funcţie de frecvenţa de conectare la mers în gol Z_0 şi regimul de funcţionare pentru motoarele trifazate cu rotorul în scurtcircuit

Regimul de funcţionare	Factorul de convertire	Frecvenţa de conectare în timpul funcţionării Z_f
Pornire	–	$Z_f = (2,2 - 3)Z_0$
Frînare în curent continuu	–	$Z_f = 1,6Z_0$
Frînare prin contracurent	–	$Z_f = Z_0$
Mase exterioare suplimentare	$k_{spl} = \frac{GD^2_{mot}}{GD^2_{mot} + GD^2_{supl}}$	$Z_f = k_{supl}Z_0$
Pornirea sub sarcină	$k_p = 1 - \frac{M_t}{M_m}$	$Z_f = k_p Z_0$
Încărcarea în timpul funcţionării	$k_s = 1 - \left(\frac{P}{P_N}\right)^2$	$Z_f = k_s Z_0$
Sarcini diferite în timpul mersului spre drepta şi spre stînga	$k_s = \frac{t_R P^2_R + t_s P^2_s}{(t_R + t_s) P^2_N}$	

7.5.4. Măsurarea puterii motoarelor electrice

Măsurarea directă

Motorul de verificat se cuplează cu o a doua maşină electrică. Măsurînd puterea electrică produsă sau absorbită şi ţinînd seama de randament, se poate determina puterea mecanică produsă. Eroarea de măsurare la puterea nominală: 2...3%.

Măsurarea indirectă

Cuplul şi turaţia se măsoară separat, calculînd din aceste rezultate puterea mecanică la ax:

$$P_M = \frac{M\omega}{102}, \quad P_M = \frac{Mn}{975}, \quad P_M = \frac{Mn}{716} \text{ [CP]}$$

unde: P_M este puterea, în kW;
M — cuplul, în kgf·m;
ω — viteza unghiulară, în s^{-1};
n — turaţia în rot/min.

În cazul unor maşini de construcţie specială cu stator mobil cu ajutorul unui dinamometru se poate măsura direct cuplul de reacţiune. Pentru dinamul frînă eroarea este 1–2% (v. fig. 7.53).

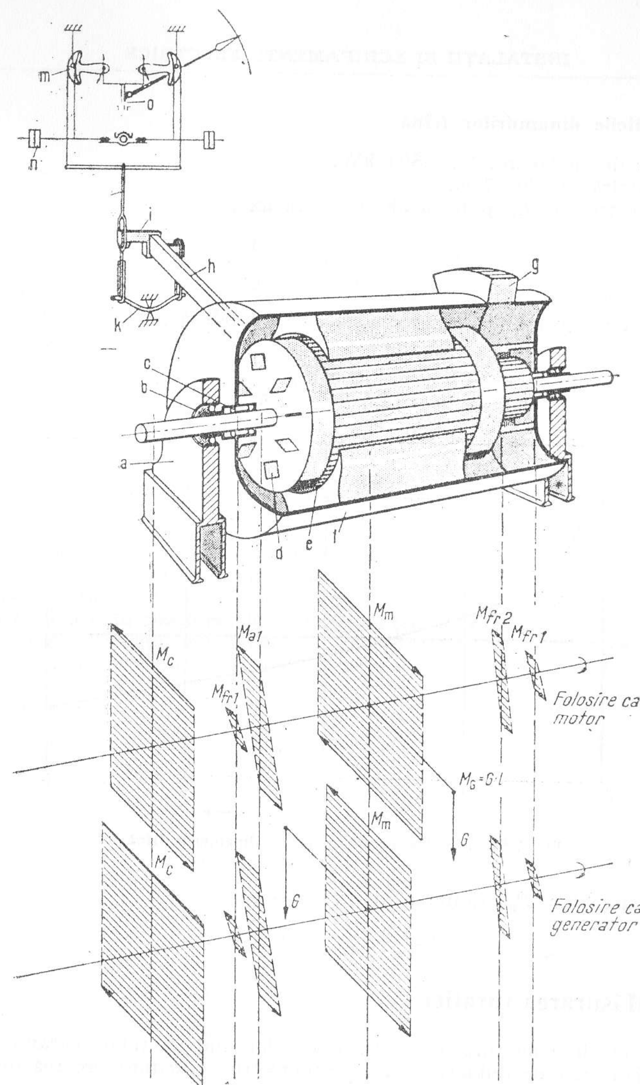


Fig. 7.53. Secţiune printr-un dinam frînă şi cuplurile în cazul utilizării ca motor şi ca generator. Cuplul transmis prin cuplaj egal cu cuplul de reacţie $M_c = M_G$: *a* — suportul lagărelor statorice; *b* — cămaşa exterioară a lagărelor statorice; *c* — lagărul rotorului; *d* — ventilator; *e* — indus; *f* — carcasă oscilantă; *g* — orificii de ieşire a aerului; *h* — pîrghie; *i* — cuţit de balanţe; *k* — suspensie de inversare; *l* — sistem de bare; *m* — segmenţi de cerc în lagăre excentrice; *n* — contragreutăţi; *o* — cremalieră; M_c — cuplul transmis prin cuplaj; M_{fr1} — cuplul de frecare în lagăr; M_{a1} — cuplul de frecare în aer; M_m — cuplul electromagnetic; M_G — cuplu de reacţie al dinamului frînă (reacţiei); M_{fr2} — cuplul de frecare al periilor.

Caracteristicile dinamurilor frînă

Domeniul de încărcare: 2... 2500 kW.
Turaţia limită: v. fig. 7.54.
Puterea de frînare P_f (puterea absorbită la ax);

$$P_f = P_G \frac{1}{\eta} = P_m \frac{1}{\eta^2}.$$

Puterea ca generator P_G (puterea electrică produsă);

$$P_G = P_f \eta = P_m \frac{1}{\eta}.$$

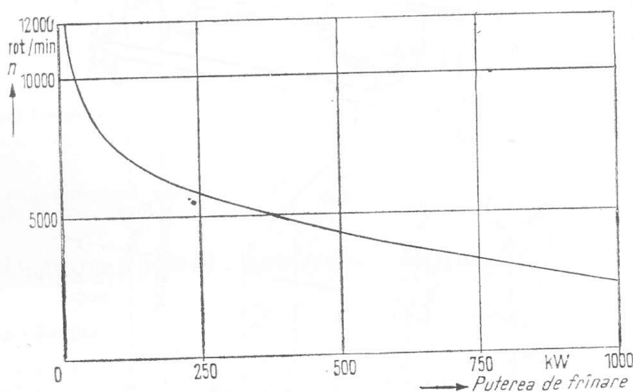


Fig. 7.54. Turaţiile maxime pentru dinamurile frînă.

Puterea ca motor P_m (puterea mecanică la ax):

$$P_m = P_f \eta^2 = P_G \eta.$$

7.5.5. Măsurarea turaţiei

Măsurări grosiere de turaţie se efectuează folosind un tahogenerator şi un voltmetru, un tahometru de inducţie sau un tahometru centrifug; eroarea de măsurare 3...5‰.

Măsurările de precizie se efectuează folosind un contor mecanic de turaţie sau un contor electronic şi un etalon de timp cu cristal de cuarţ (eroarea de măsurare la 1000 rot/min: ≤ 1‰).

8. REŢELE ELECTRICE, STAŢII DE TRANSFORMARE ŞI MUTATOARE

8.1. PARAMETRII REŢELELOR ELECTRICE ŞI VALORI CARACTERISTICE

Prima etapă de calcul a circuitelor de alimentare cu energie electrică constă în determinarea rezistenţelor şi reactanţelor sistemului de transport. Elementele principale ale unui sistem de transport sînt liniile aeriene, cablurile, transformatoarele, reactoarele, condensatoarele şi generatoarele.

În cazul sarcinilor simetrice au importanţă practică numai impedanţele sistemului de secvenţă directă Z_1. În cazul circuitelor cu sarcini asimetrice, linii asimetrice etc., trebuie să fie luate în consideraţie şi impedanţele sistemului de secvenţă inversă Z_2 şi uneori, cea de secvenţă homopolară Z_0. Impedanţele, cu excepţia impedanţelor maşinilor rotative, au aceeaşi valoare în sistemele de secvenţă directă şi inversă.

Linii aeriene

Fig. 8.1 reprezintă circuitul echivalent al unei linii aeriene (circuit în π).
Sistemul de secvenţă directă;

$Z_L = R_L + jX_L$	impedanţa serie în Ω/fază;
C_L	capacitatea în derivaţie în F/fază;
R_{aL}	rezistenţa în derivaţie în Ω/fază.

Sistemul de secvenţă homopolară:

$Z_{0L} = R_{0L} + jX_{0L}$	impedanţa homopolară în Ω/fază;
C_{0L}	capacitatea homopolară (faţă de pămînt), în F/fază;
R_{0aL}	rezistenţa homopolară în derivaţie în Ω/fază.

Parametrii electrici ai liniilor aeriene sînt examinaţi la pag. 585. Rezistenţa în derivaţie R_{aL} se poate de obicei neglija.

În cazul *liniilor cu dublu circuit*, apar reacţii din partea celui de al doilea circuit. Efectul lor este redus în cazul sistemului de secvenţă directă; de obicei, parametrii rezultanţi care se folosesc consideră cazul unor curenţi şi tensiuni egale în ambele circuite (v. pag. 585). Efectul reacţiilor este considerabil în sistemul de secvenţă homopolară, astfel trebuie să se ţină seama de cuplaj. Fig. 8.2 reprezintă un circuit echivalent în π. S-au folosit următoarele notaţii:

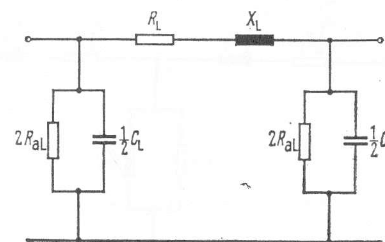


Fig. 8.1. Circuitul echivalent a liniei aeriene (reprezentare în π).

Z_{0I} şi Z_{0II} — impedanţa de secvenţă homopolară cu al doilea circuit deschis;
C_{0I} şi C_{0II} — capacitatea de secvenţă homopolară cu al doilea circuit pus la pămînt;
$Z_{0mI,\,II}$ — impedanţa mutuală de secvenţă homopolară;
$C_{0mI,\,II}$ — capacitatea mutuală de secvenţă homopolară;
$\ddot{U}$ — transformator ideal 1 : 1.

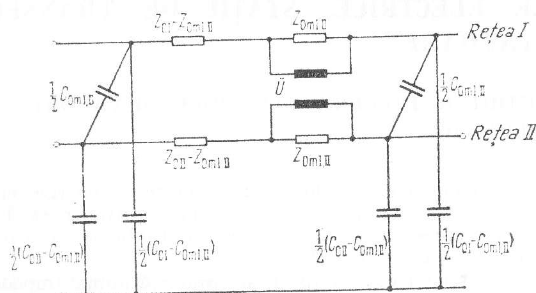


Fig. 8.2. Circuitul echivalent pentru sistemul de secvenţă homopolară al unei linii cu dublu circuit.

Cabluri

Circuitele echivalente folosite pentru linii aeriene se aplică şi la cabluri. Parametrii electrici sînt examinaţi la pag. 551-552.

Transformatoare

Fig. 8.3 reprezintă un circuit echivalent în *T*, care este suficient pentru calcule practice referitoare la transformatorul cu două înfăşurări.

Impedanţa serie. Rezistenţa echivalentă R_T şi reactanţa echivalentă de scăpări X_T sînt

$$R_T = \frac{u_r\, U_T^2}{100\, S_T}\ [\Omega/\text{fază}]; \tag{8.1}$$

$$X_T = \frac{u_x\, U_T^2}{100\, S_T}\ [\Omega/\text{fază}]; \tag{8.2}$$

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2}\ [\%]; \tag{8.3}$$

$$u_r = 0{,}1\,\frac{V_k}{S_T}\ [\%]. \tag{8.4}$$

Fig. 8.3. Circuitul echivalent al transformatorului.

unde: U_T este tensiunea nominală a transformatorului, în kV;
S_T — puterea nominală a transformatorului, în MVA;
u_k — tensiunea nominală de scurtcircuit, în %;
u_x — căderea de tensiune în reactanţa de scăpări, în %;
V_k — pierderi de scurtcircuit, în kW

În cazul transformatoarelor cu prize, impedanţa pentru fiecare poziţie se poate calcula din tensiunea reglată de mers în gol şi din tensiunea de scurtcircuit corespunzător corectată.

Impedanţa derivaţie. Rezistenţa echivalentă pierderilor în fier R_{mT} şi reactanţa de magnetizare X_{mT} sînt

$$R_{mT} = \frac{U_T^2}{V_m}\cdot 10^3\ \ [\Omega/\text{fază}]; \tag{8.5}$$

$$X_{mT} = \frac{100\, U_T^2}{i_m\, S_T}\ \ [\Omega/\text{fază}]; \tag{8.6}$$

unde: V_m reprezintă pierderile de mers în gol, în kW;
i_m — curentul de magnetizare, în % din curentul nominal;

Valorile pentru u_k, i_m, V_k şi V_m sînt date în tabelele 8.14 şi 8.17 (pag. 484 şi 486).

Impedanţa derivaţie poate fi adeseori neglijată.

Impedanţele de secvenţă homopolară ale transformatoarelor sînt examinate la pag. 480.

În cazul *transformatoarelor cu trei înfăşurări* se poate folosi un circuit echivalent în stea (fig. 8.4,*a*) Impedanţele pe ramuri se pot calcula din următoarele ecuaţii:

$$Z_{T1} = \frac{1}{2}\,(Z_{T12} - Z_{T23} + Z_{T31}); \tag{8.7}$$

$$Z_{T2} = \frac{1}{2}\,(Z_{T12} + Z_{T23} - Z_{T31}); \tag{8.8}$$

$$Z_{T3} = \frac{1}{2}\,(-Z_{T12} + Z_{T23} + Z_{T31}). \tag{8.9}$$

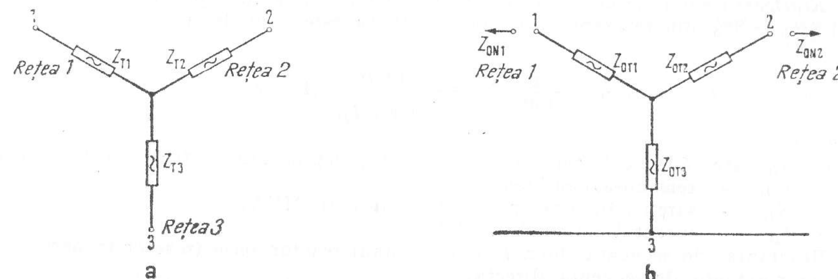


Fig. 8.4. Circuitul echivalent al transformatorului cu trei înfăşurări: *a* — sistem de secvenţă directă; *b* — sistem de secvenţă homopolară.

Z_{T12}, Z_{T23} şi Z_{T31} sînt aici impedanţele serie ale oricăror două înfăşurări. Ele se pot calcula din ecuaţiile (8.1) şi (8.2), în care trebuie introduse în fiecare caz valorile pentru u_r, u_x şi S_T corespunzătoare pentru cele două înfăşurări considerate. Schema echivalentă pentru secvenţa homopolară a unui transformator cu două înfăşurări în stea şi o înfăşurare în triunghi este reprezentată în fig. 8.4,*b*. În cazul cînd punctul neutru este legat rigid la pămînt, sistemul de secvenţă homopolară al reţelei respective este direct legat de punctul *1* sau *2*. În cazul folosirii unor impedanţe de legare la neutru (de exemplu bobine Petersen), impedanţa lor de secvenţă homopolară trebuie să fie legată între transformator şi reţea.

Reactoare

Bobinele de compensare (reactoare derivaţie). Rezistenţa R_{PD} şi reactanţa X_{PD} pentru conectare în paralel sînt date de relaţiile:

$$R_{PD} = \frac{U_{PD}^2}{V_{PD}} 10^3 \quad [\Omega/\text{fază}]; \tag{8.10}$$

$$X_{PD} = \frac{U_{PD}^2}{Q_{PD}} \quad [\Omega/\text{fază}], \tag{8.11}$$

în care: U_{PD} este tensiunea nominală în kV;
Q_{PD} — puterea nominală, în Mvar;
V_{PD} — pierderile în reactor, în kW.

În esenţă, cele arătate în privinţa impedanţei de secvenţă homopolară pentru transformatoare sînt valabile şi pentru reactoarele în derivaţie (v. pag. 480).

Bobinele Petersen şi orice alte impedanţe legate la punctul neutru sînt eficace numai în sistemul de secvenţă homopolară. Reactanţa lor de secvenţă homopolară este

$$X_{0ES} = 3\,X_{ES} = 3\,\frac{U_{ES}}{I_{ES}} \cdot 10^{-3}\ \Omega, \tag{8.12}$$

unde: U_{ES} este tensiunea nominală a reactorului (tensiunea pe fază), în kV;
I_{ES} — curentul nominal al reactorului, în *A*;
X_{ES} — reactanţa reactorului, în Ω.

Reactoare limitatoare de curent (reactoare serie). Rezistenţa R_D este de obicei neglijabilă ($R_D = 3\%$ din reactanţa X_D), iar reactanţa este dată de relaţia

$$X_D = \frac{u_D\,U_D^2}{100\,S_D} = \frac{u_D U_D}{100\sqrt{3}\,I_D} \quad [\Omega/\text{fază}], \tag{8.13}$$

în care: u_D este căderea de tensiune pe reactanţă, în procente din tensiunea nominală;
U_D — tensiunea nominală, în kV;
S_D — sarcina în serie (putere trifazată), în MVA;
I_D — curentul nominal, în kA.

Reactanţa de secvenţă homopolară a unui reactor serie (reactor în aer) este egală cu reactanţa de secvenţă directă:

$$X_{0D} = X_D.$$

Condensatoare

Condensatoarele în derivaţie. Reactanţa capacitivă X_c şi capacitatea C sînt date de relaţiile:

$$X_C = \frac{U_C^2}{Q_C}\,[\Omega/\text{fază}]; \tag{8.14}$$

$$C = \frac{Q_C}{\omega\,U_C^2} \quad [\text{F/fază}], \tag{8.15}$$

în care: U_c este tensiunea nominală a condensatorului, în kV;
Q_c — puterea condensatorului (putere trifazată), Mvar;
ω — pulsaţia reţelei $= 2\pi f$ (f în Hz).

În sistemul de secvenţă homopolară capacităţile în derivaţie intervin numai în cazul legării la pămînt a punctului neutru al stelei bateriei de condensatoare

$$X_{0C} = X_C.$$

Condensatoare serie. Reactanţa capacitivă X_{RC} şi capacitatea C_{RC} sînt date de relaţiile:

$$X_{RC} = \frac{Q_{RC}}{3\,I_{RC}^2}\,[\Omega/\text{fază}], \tag{8.16}$$

$$C_{RC} = \frac{3\,I_{RC}^2}{\omega\,Q_{RC}} \quad [\text{F/fază}], \tag{8.17}$$

în care: Q_{RC} reprezintă sarcina serie a condensatorului (putere trifazată), Mvar;
I_{RC} — curentul nominal de linie al bateriei de condensatoare, în kA.

Reactanţa de secvenţă homopolară a condensatoarelor serie este egală cu reactanţa de secvenţă directă

$$X_{0RC} = X_{RC}.$$

Rezistenţa de pierderi a condensatoarelor de putere este de obicei neglijabilă, deoarece pierderile constituie numai 0,2—0,5% din puterea nominală a condensatorului.

Generatoare

Necesare pentru sarcini simetrice în regim staţionar: reactanţele sincrone X_d şi X_q.

Necesare pentru condiţiile de regim tranzitoriu, ca de exemplu scurtcircuite: reactanţele supratranzitorii X_d'' şi X_q'' şi reactanţele tranzitorii X_d' şi X_q'.

Necesare pentru sarcini nesimetrice: reactanţa de secvenţă inversă X_2 şi reactanţa de secvenţă homopolară X_0.

Reactanţele generatorului sincron sînt examinate la pag. 353 şi se pot găsi în special în tabelul 7.2. pag. 357

Rezistenţa serie a generatoarelor este 0,5—10% din reactanţa subtranzitorie şi se poate de obicei neglija.

Circuite compuse

Pentru circuite care constau din mai multe elemente componente este util să se lucreze cu impedanţa echivalentă a unui circuit simplificat, dedus din circuitul origina

și avînd aceeași impedanță efectivă. Circuitul se simplifică prin combinarea elementelor componente legate în paralel (formule la pag. 217), iar rețelele se transformă cu ajutorul transfigurării triunghi-stea (formule la pag. 233).

În cazul cînd calculele trebuie efectuate asupra unui sistem care conține diverse trepte de tensiune, se recomandă să se utilizeze o tensiune de referință pentru întregul sistem. În acest caz transformatoarele se tratează ca transformatoare cu raportul de transformare 1 : 1.

Impedanțele tuturor, elementelor sistemului trebuie raportate la tensiunea de referință, fiind necesar să se folosească raportul de transformare real la mers în gol al transformatorului. În cazul alegerii rețelei *1* din fig. 8.5 ca rețea de referință, im-

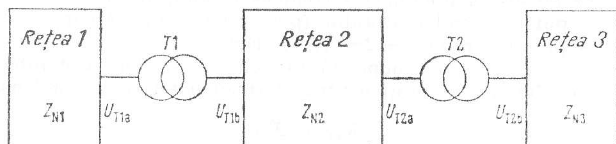


Fig. 8.5. Sistem cu mai multe trepte de tensiuni

pedanțele Z_N ale elementelor din diversele rețele separate care au fost calculate cu ajutorul tensiunii lor nominale pot fi raportate după cum urmează:

rețeaua 1: Z_{N1} (fără raportare);

rețeaua 2: $Z'_{N2} = Z_{N2}\left(\dfrac{U_{T1a}}{U_{T1b}}\right)^2;$

rețeaua 3: $Z'_{N3} = Z_{N3}\left(\dfrac{U_{T1a}}{U_{T1b}}\right)^2\left(\dfrac{U_{T2a}}{U_{T2b}}\right)^2,$

unde U_{T1a} și U_{T1b}, precum și U_{T2a} și T_{T2b} sînt tensiunile de mers în gol ale transformatoarelor T_1 și T_2.

Tensiunile generatoarelor U_G din rețele se raportează după cum urmează:

rețeaua 1: U_{G1} (fără raportare):

rețeaua 2: $U'_{G2} = U_{G2}\dfrac{U_{T1a}}{U_{T1b}};$

rețeaua 3: $U'_{G3} = U_{G3}\dfrac{U_{T1a}}{U_{T1b}}\cdot\dfrac{U_{T2a}}{U_{T2b}}.$

După calcularea sistemului complet, curenții și tensiunile reale I_N și U_N din diversele rețele se obțin din valorile calculate ale curenților și tensiunilor I'_N și U'_N cu ajutorul următoarelor relații:

rețeaua 1: $I_{N1} = I'_{N1};$ $\qquad U_{N1} = U'_{N1}$ (fără transformare);

rețeaua 2: $I_{N2} = I'_{N2}\dfrac{U_{T1a}}{U_{T1b}};$ $\qquad U_{N2} = U'_{N2}\dfrac{U_{T1b}}{U_{T1a}};$

rețeaua 3: $I_{N3} = I'_{N3}\dfrac{U_{T1a}}{U_{T1b}}\cdot\dfrac{U_{T2a}}{U_{T2b}},$ $\qquad U_{N3} = U'_{N3}\dfrac{U_{T1b}}{U_{T1a}}\cdot\dfrac{U_{T2b}}{U_{T2a}}.$

Exemple

Linii de înaltă tensiune cu sarcini multiple

O metodă suficient de exactă pentru calculul liniilor de înaltă tensiune cu sarcini multiple prin folosirea circuitelor echivalente este explicată în tabelul 8.1 pentru exemplul din fig. 8.6. Sarcinile sînt simetrice, astfel încît se aplică numai sistemul de secvență directă. Impedanțele figurate sînt raportate la tensiunea de 110 kV.

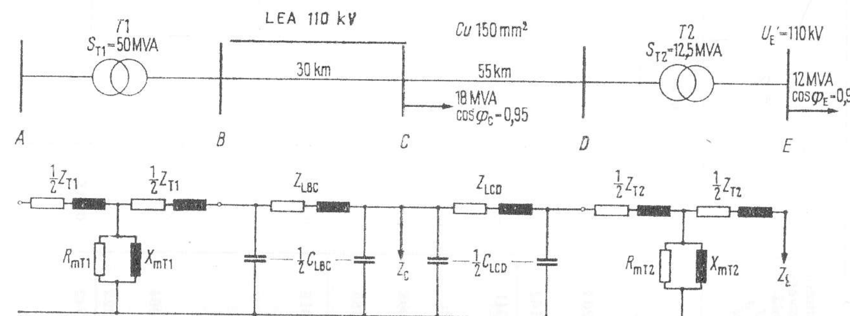


Fig. 8.6. Reprezentare schematică și circuitul echivalent a unui sistem de transport cu sarcini multiple.

Transformator T_2 (valori raportate la 110 kV)

S_{T2} = 12,5 MVA;	R_{T2} = 6,8 Ω;
u_{rT2} = 0,7%;	X_{T2} = 106 Ω;
u_{xT2} = 11%;	R_{mT2} = 504 · 10³ Ω;
V_{mT2} = 24 kW;	X_{mT2} = 46,1 · 10³ Ω
i_{mT2} = 2,1%;	

Linii aeriene	Linia *CD*	Linia *BC*
R'_L = 0,119 Ω/km;	R_{LCD} = 6,55 Ω;	R_{LBC} = 3,57 Ω;
X'_L = 0,40 Ω/km;	X_{LCD} = 22,0 Ω;	X_{LBC} = 12,0 Ω;
C'_L = 9,2 nF/km;	C_{LCD} = 506 nF;	C_{LBC} = 276 nF;
	X_{cLCD} = 6,3 · 10³ Ω	X_{cLBC} = 11,6 · 10³ Ω.

Tabelul 8.1. Calculul liniilor de transport cu sarcini multiple

Rîndul		Parametrii elementelor reţelei	Tensiunea longitudinală U_1 V	Tensiunea transversală U_q V	tg δ	cos φ	Putere activă P kW	Putere reactivă Q kvar
1	U_E	Sarcina E	110 000			0,90	10 800	5230
2		$\frac{1}{2} R_{T2} = 3{,}4\ \Omega$	334	5203			33	511
3		$\frac{1}{2} X_{T2} = 53{,}0\ \Omega$	2520	—162			8	120
4		$R_{mT2} = 504 \cdot 10^3\ \Omega$	112 854	5041	0,045			
5		$X_{mT2} = 46{,}1 \cdot 10^3\ \Omega$	113				25	277
6	U_{T2}		112 967				10 866	6138
7		$\frac{1}{2} R_{T2} = 3{,}4\ \Omega$	327	5098			31	490
8		$\frac{1}{2} X_{T2} = 53\ \Omega$	2880	− 185			10	156
9			116 174	4913	0,042		10 907	6784
10			104					
11	U_D	$2\ X_{cLCD} = 12{,}6 \cdot 10^3\ \Omega$	116 278					− 1073
12							10 907	5711
13		$R_{LCD} = 6{,}55\ \Omega$	614	2064			58	194
14		$X_{LCD} = 22\ \Omega$	1081	− 322			16	53
15			117 973	1742	0,015		10 981	5958
16		$2\ X_{cLCD} = 12{,}6 \cdot 10^3\ \Omega$	13					− 1105
17	U_C		117 986				10 981	4853
18		Sarcina C				0,95	17 100	5616
19							28 081	10 469
20		$2\ X_{cLBC} = 23{,}2 \cdot 10^3\ \Omega$						− 600
21							28 081	9869
22		$R_{LBC} = 3{,}57\ \Omega$	850	2856			202	680
23		$X_{LBC} = 12{,}0\ \Omega$	1 004	− 299			25	84
24			119 840	2557	0,021		28 308	10 633
25		$2\ X_{cLBC} = 23{,}2 \cdot 10^3\ \Omega$	27					− 619
26	U_B		119 867				28 308	10 014
27		$\frac{1}{2} R_{T1} = 0{,}72\Omega$	171	3141			40	742
28		$\frac{1}{2} X_{T1} = 13{,}3\Omega$	1111	− 61			5	93
29			121 149	3080	0,025			
30		$R_{mT1} = 186\ k\ \Omega$; $X_{mT1} = 17{,}3\ k\ \Omega$	39				79	849
31	U_{T1}		121 188				28 432	11 698
32		$\frac{1}{2} R_{T1} = 0{,}72\ \Omega$	170	3120			40	732
33		$\frac{1}{2} X_{T1} = 13{,}3\ \Omega$	1284	− 70			7	124
34			122 642	3050	0,025			
35			38					
36	U_A		122 680				28 494	12 554

Căderea totală de tensiune $\Delta U = 11{,}53\%$. Pierderi totale $\Delta P = 2{,}07\%$.

Transformator T_1 (valori raportate la 110 kV)

$S_{T1} = 50$ MVA; $R_{T1} = 1{,}45\ \Omega$;

$u_{rT1} = 0{,}6\%$; $X_{T1} = 26{,}6\ \Omega$;

$u_{xT1} = 11\%$; $R_{mT1} = 186 \cdot 10^3\ \Omega$;

$V_{mT1} = 65$ kW; $X_{mT1} = 17{,}3 \cdot 10^3\ \Omega$

$i_{mT1} = 1{,}4\%$

Elaborarea tabelului 8.1 (în următoarele formule se vor introduce tensiunile în V, puterile în kVA şi rezistenţele în Ω).

Rîndul 1, coloana 3 — tensiunea în punctul E, în V

coloana 7 şi 8 — puterea activă şi puterea reactivă a sarcinii din punctul E, în kW sau kvar

Rîndul 2, coloana 3 — tensiunea longitudinală U_1, în V

$$\frac{P}{U_E}\,\frac{1}{2}\,R_{T2} \cdot 10^3$$

coloana 4 — tensiunea transversală U_q, în V

$$\frac{P}{U_E}\,\frac{1}{2}\,X_{T2} \cdot 10^3$$

coloana 7 — pierderi, în kW

$$\left(\frac{P}{U_E}\right)^2 \frac{1}{2}\,R_{T2} \cdot 10^3$$

coloana 8 — consumul de putere reactivă, în kvar

$$\left(\frac{P}{U_E}\right)^2 \frac{1}{2}\,X_{T2} \cdot 10^3$$

Rîndul 3, coloana 3 — tensiunea longitudinală U_1, în V

$$\frac{Q}{U_E}\,\frac{1}{2}\,X_{T2} \cdot 10^3$$

coloana 4 — tensiunea transversală U_q, în V

$$-\frac{Q}{U_E}\,\frac{1}{2}\,R_{T2} \cdot 10^3$$

coloana 7 — pierderi, în kW

$$\left(\frac{Q}{U_E}\right)^2 \frac{1}{2}\,R_{l_2} \cdot 10^3$$

coloana 8 — consumul de putere reactivă, în kvar

$$\left(\frac{Q}{U_E}\right)^2 \frac{1}{2}\,X_{T2} \cdot 10^3$$

Rîndul 4, — suma tensiunilor pentru U_1 şi U_q, $\operatorname{tg}\delta = U_q/U_1$

Rîndul 5, coloana 3 — creşterea tensiunii longitudinale corespunzătoare deplasării fazorului tensiune

$$U_1\,\frac{1}{2}\,\operatorname{tg}^2\delta$$

coloana 7 — pierderile în fier ale transformatorului, în kW

$$\frac{U_{T2}^2}{R_{mT2} \cdot 10^3}$$

coloana 8 — puterea reactivă de magnetizare a transformatorului, în kvar

$$\frac{U_{T2}^2}{X_{mT2} \cdot 10^3}$$

Rîndul 6, coloana 3 — tensiunea longitudinală în punctul median al transformatorului T_2 şi

coloanele 7 şi 8 — suma puterilor activă şi reactivă

Rîndurile 7 şi 8 — tensiunile şi puterile la impedanţa $\frac{1}{2} Z_{T2}$, ca la rîndurile 2 şi 3

Rîndul 9 — sumele tensiunilor şi puterilor, $\operatorname{tg}\delta_D = U_{qD}/U_{lD}$

Rîndul 10, coloana 3 — creşterea tensiunii pe fază, în V

$$U_{lD}\,\frac{1}{2}\,\operatorname{tg}^2\delta_D$$

Rîndul 11, coloana 3 — tensiunea longitudinală în punctul D

coloana 8 — jumătate din puterea capacitivă datorită liniei CD, în kvar

$$-\frac{U_D^2}{2X_{cLCD} \cdot 10^3}$$

Rîndul 12 — suma puterilor

Rîndurile 13 şi 14 — ca rîndurile 2 şi 3 sau 7 şi 8, folosind tensiunea din rîndul 11, puterile din rîndul 12 şi impedanţa liniei CD

Rîndul 15 — suma tensiunilor şi puterilor, $\operatorname{tg}\delta_C = U_{qC}/U_{lC}$

Rîndul 16, coloana 3 — creșterea tensiunii longitudinale, în V

$$U_{1C}\,\frac{1}{2}\,\mathrm{tg}^2\delta_C$$

coloana 8 — jumătate din puterea capacitivă datorită liniei CD, în kvar

$$-\frac{U_C^2}{2X_{cLCD}\cdot 10^3}$$

Rîndul 17 — tensiunea longitudinală în punctul C și suma puterilor

Se continuă apoi calculul spre punctul A în mod similar.

Linie cu condensator serie

În tabelul 8.2 se prezintă un exemplu de calcul al unei linii de înaltă tensiune cu sarcini multiple, care conține un condensator serie pentru ameliorarea reglajului tensiunii. Pentru un curent $I = \frac{25}{\sqrt{3}\cdot 56\cdot 0{,}8} = 0{,}322$ kA s-a ales un condensator serie, trifazat, de 4,50 Mvar. Conform ecuației (8.16), reactanța capacitivă a acestui condensator serie este $X_{RC} = 4{,}5/(3\cdot 0{,}322^2)$, adică 14,46 Ω pe fiecare conductor. Restul calculelor se efectuează în mod similar cu cele din tabelul 8.1.

Factorul de sarcină și factorul de pierderi

$$G_s = \frac{A_u}{P_{max}\,t}$$ factorul de sarcină (durata de utilizare a sarcinii maxime)

$$G_V = \frac{A_v}{V_{max}\,t}$$ factorul de pierderi

unde: P_{max} este puterea maximă transportată (sarcina de vîrf) într-o anumită perioadă, în MW;

t — durata perioadei, în h;

A_u — energia transportată în timpul t, în MWh;

V_{max} — pierderile de putere la o sarcină cu putere aparentă S_{max};

A_v — pierderile de energie în perioada t.

Pentru relația $G_v = f(G_S)$ nu există o singură curbă corectă pentru fiecare caz care să țină seama de efectul factorului de putere și al fluctuației sarcinii ci numai o plajă, după cum se vede în fig. 8.7. Lățimea plajei este dată de relația $G_V = (G_S)$. Indicele 1 este valabil pentru o curbă de sarcină care conține numai valorile $P = P_{max}$ și $P = 0$. O curbă de sarcină pentru indicele 2 ar avea puterea P_{max} pentru o foarte scurtă perioadă de timp, în restul timpului existînd o sarcină constantă. Curba trasată cu linie groasă se poate folosi cu suficientă precizie în majoritatea condițiilor apărute în practică (corespunde aproximativ unui indice de 1,6).

Prin referire la perioada de 1 an = 8760 h, se obține din G_S și G_V următoarele: durata de utilizare anuală echivalentă a puterii maxime

$$t_B = G_S\cdot 8760\ \mathrm{h} = \frac{A_u}{P_{max}}$$

durata anuală echivalentă a pierderilor maxime[1]

$$t_V = G_V\cdot 8760\ \mathrm{h} = \frac{A_v}{V_{max}}.$$

[1] Metoda uzuală în România constă în determinarea timpului de pierderi τ, în funcție de G_S (denumit T_{max}) și de factorul de putere al consumului (v. N. V. Boțan ș. a. Rețelele electrice — Calculul electric. Editura tehnică, 1961, pag. 247).

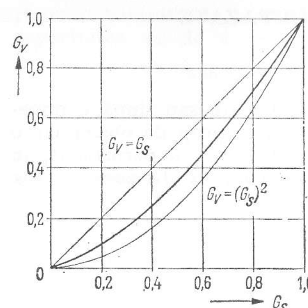


Fig. 8.7. Factorul de pierderi în funcție de factorul de sarcină

Tabelul 8.2. **Linie de transport cu condensator serie**

Linii de transport și sarcini	A — 20 km — B — Cu 120 mm² 43 km — RC 56 kV C; 1,5 MW cos φ = 0,8; 25 MW cos φ = 0,8					
Linii	**Tensiunea longitudinală U_1 V**	**Tensiunea transversală V**	$\frac{1}{2}\,\mathrm{tg}^2\delta$	**cos φ**	**Putere activă P kW**	**Putere reactivă Q kvar**
Punctul C	56 000			0,8	25 000	18 750
$X_{RC} = -14{,}46$ Ω	− 4841	− 6455			—	− 4500
$2\,X_{cLBC} = 16{,}3\cdot 10^3$ Ω	51 159					14 250
	407		0,008		—	− 161
	51 566				25 000	14 089
$R_{LBC} = 6{,}49$ Ω	3146	8339			1525	4043
$LBC = 17{,}2$ Ω	4699	− 1773			484	1284
	59 411	6566			27 009	19 416
$2\,X_{cLBC} = 16{,}3\cdot 10^3$ Ω	363		0,006		—	− 219
	59 774				27 009	19 197
				0,8	1500	1125
Punctul B	59 774				28 509	20 322
$2\,X_{cLAB} = 35\cdot 10^3$ Ω					—	− 102
	59 774				28 509	20 220
$R_{LAB} = 3{,}02$ Ω	1440	3815			687	1820
$LAB = 8{,}0$ Ω	2706	− 1022			346	916
	63 920	2793	0,001		29 542	22 956
$2\,X_{cLAB} = 35\cdot 10^3$ Ω	61				—	− 117
Punctul A	63 981				29 542	22 839

8.2. CURENŢI DE SCURTCIRCUIT ÎN SISTEME TRIFAZATE

8.2.1. Calculul curenţilor de scurtcircuit

În cazul unui scurtcircuit la bornele generatoarelor trifazate sau după o impedanţă echivalentă de sistem, apar curenţi de scurtcircuit care încep de obicei cu o valoare ridicată, de şoc, dar care descresc pînă la o valoare de regim permanent, în concordanţă cu constantele de timp ale circuitelor. Curba care reprezintă acest proces este dată în figura 8.8.

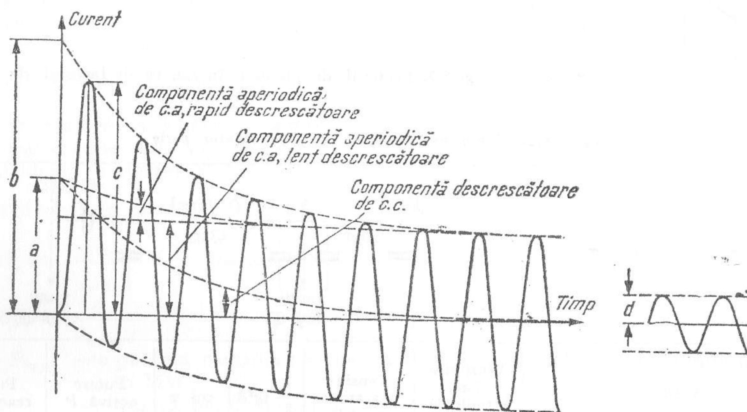


Fig. 8.8. Variaţie tip pentru curentul de scurtcircuit în momentul cel mai defavorabil de închidere a circuitului:
a — valoarea iniţială a componentei aperiodice de c. c. I_g; $b/2\sqrt{2}$ — curentul simetric iniţial de scurtcircuit I''_k ; *c* — curentul de şoc de scurtcircuit I_s; *d* — curentul permanent de scurtcircuit.

Curentul de şoc de scurtcircuit (asimetric) I_s este valoarea instantanee maximă a acestui curent pentru condiţii iniţiale de scurtcircuit date şi este indicat ca o valoare de vîrf. Pe lîngă componenta de curent alternativ, conţine şi componenta de curent continuu I_g care apare la un scurtcircuit brusc. Valoarea I_s determină eforturile dinamice în părţile componente ale instalaţiei, precum şi curentul care trece prin aparatajul de manevră.

I''_k este valoarea efectivă a curentului simetric iniţial de scurtcircuit şi serveşte ca bază pentru calcularea curentului de şoc I_s de scurtcircuit (asimetric) precum şi a curentului şi puterii de rupere. Curentul de rupere I_a este valoarea efectivă a componentei de curent alternativ a curentului de scurtcircuit în momentul separării contactelor întreruptorului.

Curentul permanent de scurtcircuit I_k este curentul simetric care se menţine după perioada tranzitorie; el se dă ca valoare efectivă.

Defectele care apar în general în sistemele trifazate şi relaţiile pentru calculul curentului de scurtcircuit simetric iniţial I''_k sînt indicate în tabelul 8.3. Curentul de scurtcircuit trifazat este factorul determinant în ceea ce priveşte alegerea echipamentului şi capacitatea sa de a rezista la scurtcircuite.

Tabelul 8.3. Formule pentru unele cazuri de scurtcircuit[1]

Tipul de defect	Formula de calcul
Trifazat	$I''_{k(3)} = \frac{1,1\, U}{\sqrt{3}Z}$
Bifazat	$I''_{k(2)} = \frac{1,1\, U}{2Z}$
Monofazat	$I''_{k(1)} = \frac{1,1\sqrt{3}U}{2Z + Z_0 + 3Z_p}$
Bifazat cu pămînt	$I'_{k(pp)} = \frac{1,1 \cdot 3U}{\frac{6Z_I Z_{II} + 2Z_{III} (Z_I + Z_{II}}{Z_I + Z_{II} + Z_{III}}} + Z_{0III}$

[1]) Spre deosebire de modul obişnuit de scriere în manualele din România a formulelor pentru curent, *U* reprezintă tensiunea între faze şi nu de fază, deci coeficienţii sînt micşoraţi cu $\sqrt{3}$.

Simboluri şi definiţii

$I_s = \varkappa\sqrt{2}I''_k$ curentul de şoc de scurtcircuit (asimetric), în kA;

$I_a = \mu I''_k$ curentul de rupere în kA;

I_k curentul permanent de scurtcircuit, în kA;

$I_{k(3)} = \lambda I_N$, $I_{k(2)} = \sqrt{3}\lambda I_N$, $I_{k(1)} = 3\lambda I_N$ — I_N curentul nominal al generatorului, în kA;

$S''_k = I''_k \sqrt{3}\, U$ puterea iniţială simetrică de scurtcircuit;

$S_a = I_a\sqrt{3}\, U$ puterea de rupere;

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ impedanţa de secvenţă directă a căii de scurtcirucit, în Ω/conductor;

$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ impedanţa de secvenţă homopolară a căii de scurtcircuit, în Ω/conductor;

$Z_p = \sqrt{R_p^2 + X_p^2}$ impedanţa pămîntului în Ω,

unde: U este tensiunea nominală a sistemului (tensiunea între faze), în kV;
R — rezistenţe; X — reactanţe inductive;
$\varkappa$ — factor, care indică efectul componentei aperiodice de curent continuu; depinde de raportul R/X al căii de scurtcircuit şi se poate determina din fig. 8.9:
μ — factor care determină descreşterea curentului iniţial simetric de scurtcircuit pînă la începutul separării contactelor; depinde de raportul I_k''/I_N al generatorului şi se poate determina din fig. 8.10;
λ — factor care permite determinarea mărimii curentului de scurtcircuit I_k din raportul I_k''/I_N. Curbele λ din fig. 8.11 şi 8.12 sînt construite pentru generatoare la plină sarcină şi la excitaţie de mers în gol, presupunînd valori uzuale pentru x_d'', x_d' şi x_d.

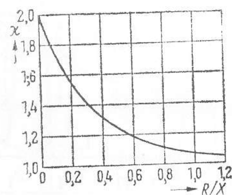


Fig. 8.9. Factorul $\varkappa$.

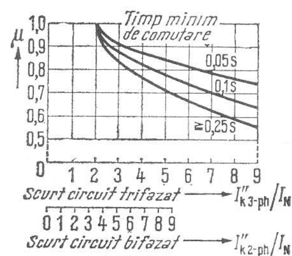


Fig. 8.10. Factorii μ.

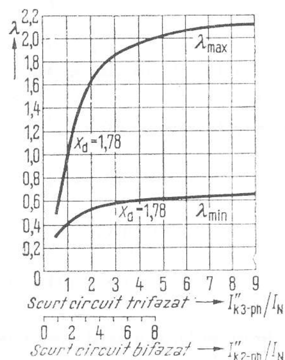


Fig. 8.11. Factori λ pentru turbogeneratoare.

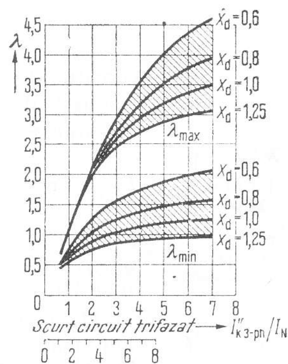


Fig. 8.12. Factori λ pentru generatoare cu poli aparenţi.

Valorile impedanţelor elementelor circuitului

Impedanţa de secvenţă directă a elementelor simetrice este impedanţa măsurată în condiţii de sarcină simetrică şi este deci egală cu impedanţa pe fază a liniilor, impedanţa de scurtcircuit a transformatoarelor şi reactoarelor şi impedanţa efectivă a generatorului în momentul scurtcircuitului.

Impedanţa de secvenţă homopolară este impedanţa care rezultă atunci cînd cele trei faze ale sistemului trifazat sînt legate în paralel şi li se aplică o tensiune alternativă monofazată; ea trebuie luată în consideraţie numai pentru acele părţi ale sistemului în care poate circula un curent de secvenţă homopolară printr-un punct de defect la pămînt sau prin conductorul neutru; de exemplu, în cazul unui defect monofazat la pămînt, curentul circulă între locul defectului şi steaua pusă la pămînt, în cazul elementelor de reţea legate rigid la pămînt. În cazul unui defect bifazat la pămînt într-un sistem cu neutrul izolat curentul circulă între cele două puncte de defect.

Generatoare (v. şi pag. 357 tabelul 7.2).

Rezistenţa armăturii R_G neglijabilă

$$\frac{R_G}{X_d''} \approx 0{,}03$$

$$X_d'' = \frac{x_d'' U_G^2}{100\, S_G} \; [\Omega/\text{fază}],$$

unde: X_d'' este reactanţa supratranzitorie, în Ω;
S_G — puterea nominală a generatorului, în MVA;
U_G — tensiunea nominală a generatorului, în kV;
x_d'' — reactanţa supratranzitorie a generatorului, în %.

Valori medii pentru x_d'':
— aproximativ 12% pentru turbogeneratoare (v. pag. 357);
— aproximativ 20% pentru generatoare cu poli aparenţi.

Pentru calculele de scurtcircuit, generatoarele funcţionînd în paralel şi avînd puteri nominale diferite, dar aceleaşi reactanţe supratranzitorii, pot fi reprezentate printr-un generator echivalent avînd puterea egală cu suma puterilor fiecărui generator.

Motoare sincrone

Din punctul de vedere al calculului, motoarele sincrone se tratează în acelaşi mod ca şi generatoarele.

Motoare asincrone

În cazul scurtcircuitelor trifazate la care participă motoare asincrone trebuie determinată contribuţia acestora la curentul de şoc de scurtcircuit (asimetric) şi la curentul de rupere. Reactanţa de scăpări a acestor motoare se poate presupune cu aproximaţie ca fiind 20%. În cazul scurtcircuitelor bifazate, motoarele asincrone dau şi un curent de scurtcircuit permanent.

Transformatoare cu două înfăşurări

Rezistenţa

$$R_T = \frac{u_r U_T^2}{100 S_T} [\Omega/\text{fază}],$$

reactanţa

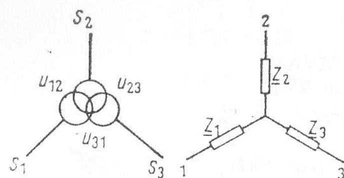
$$X_T = \frac{u_x U_T^2}{100 S_T} [\Omega/\text{fază}],$$

unde: S_T este puterea nominală a transformatorului, în MVA;
U_T — tensiunea nominală a transformatorului, în kV;
u_r — căderea de tensiune rezistivă (pierderi de scurtcircuit), în %;
u_x — tensiunea de scăpări, în % ($u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2}$) unde u_k este tensiunea de scurtcircuit, în %).

Dacă u_k este mai mare decît 5%, ea poate fi considerată egală cu u_x. De obicei R_T este neglijabilă pentru transformatoarele mari. Pentru valori caracteristice ale lui u_k şi u_r, vezi tabelele 8.15 şi 8.18.

Impedanţa de secvenţă homopolară a transformatoarelor depinde de tipul conexiunii. Pentru valori v. pag. 481.

Transformatoare cu trei înfăşurări



$$Z_1 = \left(\frac{u_{12}}{S_{12}} + \frac{u_{31}}{S_{31}} - \frac{u_{23}}{S_{23}}\right) \frac{U_N^2}{2 \cdot 100} [\Omega/\text{fază}];$$

$$Z_2 = \left(\frac{u_{23}}{S_{23}} + \frac{u_{12}}{S_{12}} - \frac{u_{31}}{S_{31}}\right) \frac{U_N^2}{2 \cdot 100} [\Omega/\text{fază}];$$

$$Z_3 = \left(\frac{u_{31}}{S_{31}} + \frac{u_{23}}{S_{23}} - \frac{u_{12}}{S_{12}}\right) \frac{U_N^2}{2 \cdot 100} [\Omega/\text{fază}],$$

unde: u_{12} reprezintă tensiunea de scurtcircuit raportată la S_{12}, în %;
u_{23} — tensiunea de scurtcircuit raportată la S_{23}, în %;
u_{31} — tensiunea de scurtcircuit raportată la S_{31}, în %;
S_{12}, S_{23}, S_{31} — puterea nominală aparentă a transformatorului.

Reactoare limitatoare de curent

Rezistenţa R_D neglijabilă

$$\frac{R_D}{X_D} \approx 0{,}03.$$

Reactanţa inductivă

$$X_D = \frac{u_D U_D}{100 \sqrt{3} I_D} \quad \text{sau} \quad \frac{u_D U_D^2}{100 S_D} [\Omega/\text{fază}].$$

unde: U_D este tensiunea nominală a reactorului, în kV;
u_D — căderea de tensiune pe reactanţa reactorului în %;
S_D — puterea aparentă a reactorului, în MVA;
I_D — curentul nominal al reactorului, în kA.

Cabluri

Pentru rezistenţa R, în Ω/km de conductor v. tabelul 8.42, pag. 553. Pentru reactanţa inductivă X, în Ω/km de conductor V. pag. 554-556. Pentru calcule aproximative se poate folosi o reactanţă inductivă medie de 0,1 Ω/km conductor. Pentru impedanţa de secvenţă homopolară a cablurilor v. tabelul 8.47 pag. 556.

Linii aeriene

Pentru rezistenţa R, în Ω/km de conductor v. tabelul 8.42 pag. 553. Pentru reactanţa inductivă X în Ω/km de conductor v. fig. 8.112, pag. 587. Pentru calcule aproximative se pot folosi pentru reactanţa inductivă valorile date mai jos:

X = 0,4 Ω/km de conductor, pentru linii cu tensiunea peste 30 kV;

X = 0,35 Ω/km de conductor, pentru linii cu tensiunea pînă la 30 kV.

Pentru impedanţa de secvenţă homopolară a liniilor v. tabelul 8.79, pag. 595. Pentru rezistenţa curentului închis prin neutru este necesar să se adauge 0,15Ω/km la valorile din tabelul 8.42, pag. 553 (rezistenţa căii de întoarcere prin pămînt).

Bare colectoare şi aparataj în staţii

Rezistenţa R (neglijabilă). Pentru reactanţa inductivă X se poate folosi în calcule aproximative valoarea de 0,15 Ω /km de conductor.

În cazul instalaţiilor cu tensiunea nominală de peste 1 kV aceste reactanţe se determină rareori, deoarece sînt neglijabile în comparaţie cu valorile reactanţelor generatoarelor, transformatoarelor şi reactoarelor.

Reactanţa inductivă a legăturilor la barele colectoare în instalaţiile de joasă tensiune nu este însă neglijabilă. În cazul cînd staţia are tensiunea nominală pînă la 500 V, la calculul curenţilor de scurtcircuit trebuie să se ţină seama de lungimea legăturilor de pe partea secundară, chiar dacă acestea au o lungime de numai cîţiva metrii În staţiile de joasă tensiune, efectele de limitare ale curentului de scurtcircuit (rezistenţe de contact, rezistenţa de arc) pot ajunge pînă la 30% şi mai mult, dar acestea sînt greu, dacă nu imposibil, de evaluat.

Determinarea impedanţei echivalente Z a căii de scurtcircuit

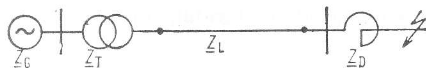
Impedanţa se defineşte după cum urmează:

$$\underline{Z} = Z e^{j\alpha} = Z(\cos\alpha + j \sin\alpha) = R + jX,$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \alpha = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}.$$

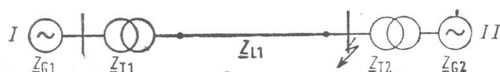
Cazuri generale de scurtcircuit

a) Scurtcircuit alimentat de o singură sursă



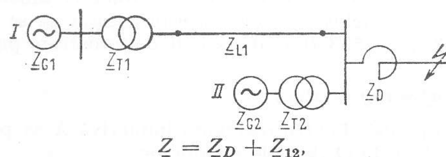
$$\underline{Z} = \underline{Z}_G + \underline{Z}_T + \underline{Z}_L + \underline{Z}_D.$$

b) Scurtcircuit alimentat de mai multe surse pe diferite căi de curent



$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{G1} + \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L1}; \quad \underline{Z}_2 = \underline{Z}_{G2} + \underline{Z}_{T2}; \quad I''_{ktot} = I''_{kI} + I''_{kII}.$$

c) Scurtcircuit alimentat de mai multe surse parţial pe căi comune de curent

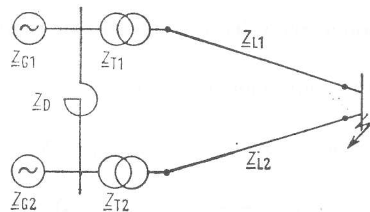


$$\underline{Z} = \underline{Z}_D + \underline{Z}_{12},$$

unde: $\underline{Z}_{12}$ este impedanţa echivalentă a impedanţelor $\underline{Z}_1$ şi $\underline{Z}_2$ legate în paralel.

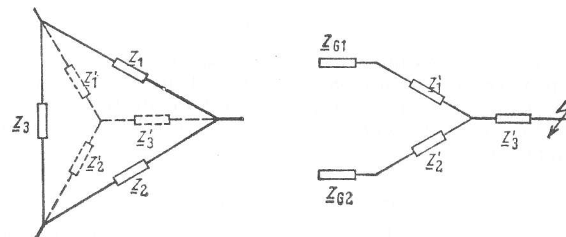
Se ia $I''_{kI} = I''_{ktot} \cdot \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_1}$ şi $I''_{kII} = I''_{ktot} \cdot \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_2}$ pentru determinarea coeficienţilor μ.

d) Scurtcircuit alimentat de mai multe surse prin sistem de reţele interconectate



Se aplică următoarele relaţii: $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L1}$; $\underline{Z}_2 = \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L2}$; $\underline{Z}_3 = Z_D$.

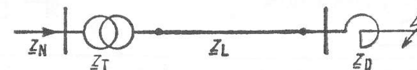
Conexiunile în triunghi se elimină prin transfigurarea triunghi-stea cu valorile reale ale impedanţelor, calculele fiind efectuate în mod obişnuit cu regulile date la pag. 233



Schema circuitului echivalent de mai sus, rezultată din transfigurare, se tratează de aici înainte ca la pag, 414 cazul de scurtcircuit c).

Caz special I

O parte din sistem este legată la un punct de alimentare cu putere de scurtcircuit cunoscută.



În cazul cînd se cunoaşte numai puterea de scurtcircuit într-un punct dat din sistem, în locul puterii generatorului, se poate calcula impedanţa sistemului prin care se face alimentarea scurtcircuitului din expresia

$$Z_N = \frac{1{,}1\, U^2}{S''_k} \; [\Omega/\text{conductor}],$$

$$\underline{Z} = \underline{Z}_N + \underline{Z}_T + \underline{Z}_L + \underline{Z}_D.$$

Sistemele cu conexiuni în triunghi, sau cele cu mai multe surse se tratează în modul expus la p. 414 ultimul exemplu însă pentru punctul de alimentare cu o putere de scurtcircuit cunoscută, nu trebuie să se determine coeficienţii μ şi λ.

Caz special II

Sisteme cu mai multe trepte de tensiuni.

În cazul acesta, toate impedanţele trebuie să fie raportate la o tensiune aleasă ca referinţă, care poate fi una din tensiunile sistemului, sau oricare altă tensiune. Impedanţă Z_1, determinată pentru tensiunea de sistem U_1, devine Z_2 la tensiunea de referinţă U_2, unde

$$Z_2 = Z_1 \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2.$$

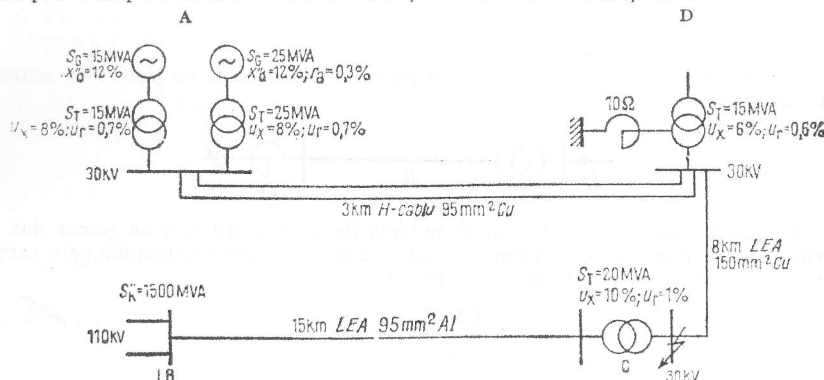
Pentru a obţine curenţii corespunzători tensiunii reale a sistemului, curenţii determinaţi pentru tensiunea de referinţă trebuie să fie transformaţi conform relaţiei

$$I_1 = I_2 \frac{U_2}{U_1}.$$

Se recomandă a se raporta impedanţele generatoarelor, transformatoarelor şi reactoarelor la tensiunea de sistem chiar din punctul de scurtcircuit, astfel încît să fie necesară numai o singură transformare a impedanţelor de linie. De aceea, ori de cîte ori se efectuează un calcul de scurtcircuit este necesar să se specifice la ce tensiune sînt raportate impedanţele.

Exemplu de calcul de scurtcircuit

Centrala *A* este legată la sistemul de înaltă tensiune din *B* prin intermediul unor linii în cablu şi aeriene; se cere să se determine curenţii de scurtcircuit de pe barele colectoare de 30 kV ale staţiei de transformare din *C* — la defect trifazat şi la defect monofazat. Punctul neutru al sistemului este legat la pămînt la transformatorul *Dy* din staţia *D*, prin intermediul unei reactanţe inductive de 10 Ω (*R*/*X* = 0,03). Timpul minim pînă la începerea deschiderii contactelor este 0,25 s. Tensiunea de referinţă este 30 kV.



Determinarea impedanţelor de secvenţă directă şi homopolară

Impedanţele generatoarelor şi transformatoarelor din centrala *A*. Deoarece generatoarele au aceleaşi reactanţe supratranzistorii şi sînt conectate direct la transformatoare, impedanţa echivalentă se poate determina din puterea totală şi reactanţa totală:

$$X_{G\,T} = \frac{(12 + 8) \cdot 30^2}{100 \cdot 40} = 4{,}5\ \Omega/\text{fază};$$

$$R_{G,T} = \frac{(0{,}3 + 0{,}7) \cdot 30^2}{100 \cdot 40} = 0{,}23\ \Omega/\text{fază}.$$

Linia dublă în cablu, de 3 km, 95 mm², Cu

$$R_K = \frac{0{,}2}{2}\, 3 = 0{,}3\ \Omega/\text{conductor};$$

$$X_K = \frac{0{,}126}{2}\, 3 = 0{,}19\ \Omega/\text{conductor}.$$

LEA de 8 km, 150 mm². Cu

$$R_L = 0{,}12 \cdot 8 = 0{,}96\ \Omega/\text{conductor};$$

$$X_L = 0{,}35 \cdot 8 = 2{,}80\ \Omega/\text{conductor}.$$

Impedanţa transformatorului din staţia *C*

$$R_T = \frac{1 \cdot 30^2}{100 \cdot 20} = 0{,}45\ \Omega/\text{fază};$$

$$X_T = \frac{10 \cdot 30^2}{100 \cdot 20} = 4{,}5\ \Omega/\text{fază}.$$

LEA de 15 km, 95 mm², Al

$$R_L = 0{,}32 \cdot 15 \left(\frac{30}{110}\right)^2 = 0{,}36\ \Omega/\text{conductor};$$

$$X_L = 0{,}41 \cdot 15 \left(\frac{30}{110}\right)^2 = 0{,}46\ \Omega/\text{conductor}.$$

Impedanţa sistemului de înaltă tensiune pînă la punctul *B*

$$Z_N \approx X_N = \frac{1{,}1 \cdot 30^2}{1\,500} = 0{,}66\ \Omega/\text{fază}.$$

Pentru a determina curentul de scurtcircuit monofazat, în afară de aceste impedanţe de secvenţă directă sînt necesare valorile impedanţelor de secvenţă homopolară ale sistemului, între punctul de legare la pămînt şi punctul de defect.

Impedanţa de punere la pămînt la transformatorul *D*

$$3R_E = 0{,}9\ \Omega/\text{fază};$$

$$3X_E = 30\ \Omega/\text{fază}.$$

Impedanţa de secvenţă homopolară a transformatorului *D*

$$R_{0T} = \frac{0{,}6 \cdot 30^2}{100 \cdot 15} = 0{,}36\ \Omega/\text{fază};$$

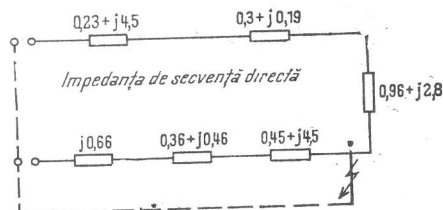
$$X_{0T} = \frac{6 \cdot 30^2}{100 \cdot 15} = 3{,}6\ \Omega/\text{fază}.$$

Impedanţa de secvenţă homopolară a LEA de 8 km, 150 mm², Cu, conform tabelului 8.79, pag. 595.

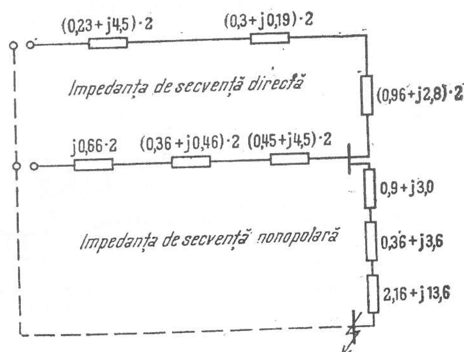
$$R_{0L} = (0{,}12 + 0{,}15)\ 8 = 2{,}16\ \Omega/\text{conductor};$$

$$X_{0L} = 1{,}7 \cdot 8 = 13{,}6\ \Omega/\text{conductor}.$$

Circuit echivalent pentru determinarea scurtcircuitului trifazat



Circuit echivalent pentru determinarea componentelor scurtcircuitului monofazat.



Determinarea valorilor curenților de scurtcircuit trifazat

Aportul centralei A

Impedanța echivalentă pînă la punctul de defect

$$\begin{array}{r} 0{,}23 + j\ 4{,}5 \\ 0{,}30 + j\ 0{,}19 \\ 0{,}96 + j\ 2{,}80 \\ \hline 1{,}49 + j\ 7{,}49 \end{array}$$

$$_{A} = 1{,}49 + j\ 7{,}49\ \Omega/\text{fază}.$$

$$Z_A = \sqrt{1{,}49^2 + 7{,}49^2} = 7{,}64\ \Omega/\text{fază}.$$

Astfel curentul inițial simetric de scurtcircuit devine

$$I''_{kA} = \frac{1{,}1 \cdot 30}{\sqrt{3} \cdot 7{,}64} = 2{,}5\ \text{kA}.$$

Mai departe se calculează:

$$\frac{R}{X} = \frac{1{,}49}{7{,}49} = 0{,}2; \quad \chi = 1{,}54;$$

$$I_{sA} = 1{,}54\ \sqrt{2} \cdot 2{,}5 = 5{,}45\ \text{kA}.$$

Curentul nominal al generatoarelor din centrala A (raportat la 30 kV) este

$$I_{NA} = \frac{40}{\sqrt{3} \cdot 30} = 0{,}77\ \text{kA}.$$

Deoarece pentru $\dfrac{I''_{kA}}{I_{NA}} = \dfrac{2{,}5}{0{,}77} = 3{,}24$ se obține conform fig. 8.10, valoarea $\mu = 0{,}81$, curentul trifazat de rupere devine

$$I_{aA} = 0{,}81 \cdot 2{,}5 = 2{,}02\ \text{kA}.$$

Aportul sistemului de înaltă tensiune din punctul B.

Impedanța totală pînă la punctul de defect devine în acest caz

$$\begin{array}{r} 0{,}45 + j\ 4{,}5 \\ 0{,}36 + j\ 0{,}46 \\ 0{,}02 + j\ 0{,}66 \\ \hline 0{,}83 + j\ 5{,}62 \end{array}$$

$$\underline{Z}_B = 0{,}83 + j\ 5{,}62 \qquad \Omega/\text{fază}.$$

$$Z_B = \sqrt{0{,}83^2 + 5{,}62^2} = 5{,}68\ \Omega/\text{fază}.$$

Astfe

$$I''_{kB} = \frac{1{,}1 \cdot 30}{\sqrt{3} \cdot 5{,}68} = 3{,}35\ \text{kA}.$$

În cazul curentului de scurtcircuit din sistemul de înaltă tensiune

$$\frac{R}{X} = \frac{0{,}83}{5{,}62} = 0{,}148; \quad \chi = 1{,}63;$$

avem

$$\mu_1 = 1, \text{ astfel că } I_{aB} = I''_{kB}.$$

Valorile totale ale curentului și puterii de scurtcircuit in punctul C

$$I_{sB} = 1{,}63\ \sqrt{2} \cdot 3{,}35 = 7{,}71\ \text{kA};$$

$$I''_{ktot} = 2{,}5 + 3{,}35 = 5{,}85\ \text{kA};$$

$$I_{a\,tot} = 2{,}02 + 3{,}35 = 5{,}37\ \text{kA};$$

$$I_{s\,tot} = 5.45 + 7{,}71 = 13{,}16\ \text{kA}$$

$$S_a = \sqrt{3} \cdot 5{,}37 \cdot 30 = 279\ \text{MVA}.$$

Determinarea curentului de scurtcircuit monofazat

După cum se poate vedea din circuitul echivalent, impedanțele de secvență directă Z_A și Z_B trebuie conectate în acest caz, în paralel, impedanțele din circuitul de secvență homopolară trebuind să fie adăugate acestei impedanțe în paralel. În vederea calculării curentului de scurtcircuit monofazat impedanța în paralel a sistemului de secvență directă trebuie să fie dublată [1]).

Impedanța în paralel este

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_B}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B} = \frac{(1{,}49 + j\ 7{,}49)\ (0{,}81 + j\ 5{,}62)}{2{,}3 + j\ 13{,}11} = 0{,}51 + j\ 3{,}22\ \ \Omega/\text{fază},$$

ar impedanța totală a căii de scurtcircuit este

$$\begin{aligned} 2\,\underline{Z} &= 1{,}02 + j\ 6{,}44 \\ \underline{Z}_0 &= 2{,}52 + j\ 17{,}2 \\ 3\,\underline{Z}_p &= 0{,}90 + j\ 30{,}0 \\ \hline & \quad 4{,}44 + j\ 53{,}64 \end{aligned} \qquad \begin{aligned} \underline{Z}_{tot} &= 4{,}44 + j\ 53{,}64\ \Omega/\text{fază}; \\ Z_{tot} &= 53{,}9\ \Omega/\text{fază}. \end{aligned}$$

Curentul inițial simetric de scurtcircuit monofazat este deci

$$I''_{k(1)} = \frac{1{,}1\ \sqrt{3} \cdot 30}{53{,}9} = 1{,}06\ \text{kA}.$$

8.2.2. Solicitări termice datorite curentului de scurtcircuit

Solicitarea termică depinde de durata și mărimea curentului de scurtcircuit, care descrește, pornind de la o valoare maximă — curentul de șoc de scurtcircuit (asimetric) — pînă la valoarea permanentă. Diferențe mari de valori ale curenților de scurtcircuit sînt remarcate în mod special la scurtcircuitele care se produc în apropierea generatorului. În cazul cînd defectul se produce la mare depărtare, reactanța generatorului devine neînsemnată în comparație cu cea a restului sistemului, curentul de scurtcircuit este practic constant; singura excepție constă în regimul tranzitoriu de la începutul scurtcircuitului provocat de componenta de curent continuu.

Fig. 8.13 ... 8.24 permit dimensionarea cablurilor, liniilor și a aparatajului cu suficientă exactitate, ținînd seama de solicitările termice; în acest fel se evită calcule laborioase. Formula pentru secțiunea conductorului q indicată în diagrame se obține din relația:

$$q = \frac{I_k\, 1000\ \sqrt{t}}{\sqrt{4{,}184\ \dfrac{c\rho_d}{\rho_r \alpha}\ \ln[1 + \alpha(\theta_{max} - \theta_1)]}},$$

în care: q, în mm²;
I_k, în kA;
t, în s;

[1]) Se consideră impedanță de secvență directă egală cu cea de secvență inversă.

c — căldura specifică (v. tabelul 2.11, pag. 59):
pentru Cu 0,0925 cal/g.grd;
pentru Al 0,217 cal/g.grd;

ρ_d — densitatea (v. tabelul 2.11, pag. 59):
pentru Cu 8,9 g cm^{-3};
pentru Al 2,7 g cm^{-3};

ρ_r — rezistivitatea, în Ωmm² m^{-1}, la temperatura θ_1;

$$\rho_r = \rho_{20}[1 + \alpha(\theta_1 - 20)]\ \ \text{(v. tabelul 2.21, pag. 82)}$$

ρ_{20} — rezistivitatea la 20°C;
pentru Cu 0,0178 Ωmm² m^{-1};
pentru Al 0,0286 Ωmm² m^{-1};

$\alpha = 0{,}004$;

θ_1 temperatura inițială, în °C;

θ_{max} temperatura maximă, în °C.

În diagramele din fig. 8.13 ... 8.24 curentul de scurtcircuit este considerat ca o valoare constantă. Pentru a permite folosirea acestei valori constante la scurtcircuite în apropierea generatorului, caz în care curentul variază mult în timpul scurtcircuitului (chiar pentru scurtcircuite cu o durată foarte redusă, cînd componenta de curent continuu este încă eficace din punctul de vedere al încălzirii), trebuie să se introducă o valoare medie efectivă a curentului (v. fig. 8.13). Acest curent produce același efect termic ca și curentul variabil care circulă în realitate.

Acest curent notat cu $I_{k\,med}$ se folosește ca o valoare constantă atunci cînd se dimensionează liniile și aparatajul.

Exemplu

Pentru un punct din sistem se dau următoarele valori ale curentului de scurtcircuit:

$$I_s = 60\ \text{kA};\ \ I''_k = 25\ \text{kA};\ I_k = 10\ \text{kA};\ \text{timp de rupere}\ t = 0{,}5\ \text{s}.$$

Care este valoarea lui $I_{k\,med}$ care trebuie folosită pentru calculul solicitării termice?

Rezolvare. Se calculează coeficientul

$$\varkappa = \frac{I_s}{\sqrt{2} \cdot I''_k} = \frac{60}{\sqrt{2} \cdot 25} = 1{,}7$$

și apoi raportul

$$\frac{I''_k}{I_k} = \frac{25}{10} = 2{,}5.$$

Pentru $t = 0{,}5$ s se iau din fig. 8.13 următoarele date: $m = 0{,}06$ ș $n = 0{,}7$

Curentul mediu efectiv este

$$I_{k\,med} = I''_k\ \sqrt{m + n} = 25\ \sqrt{0{,}06 + 0{,}7} = 21{,}8\ \text{kA}.$$

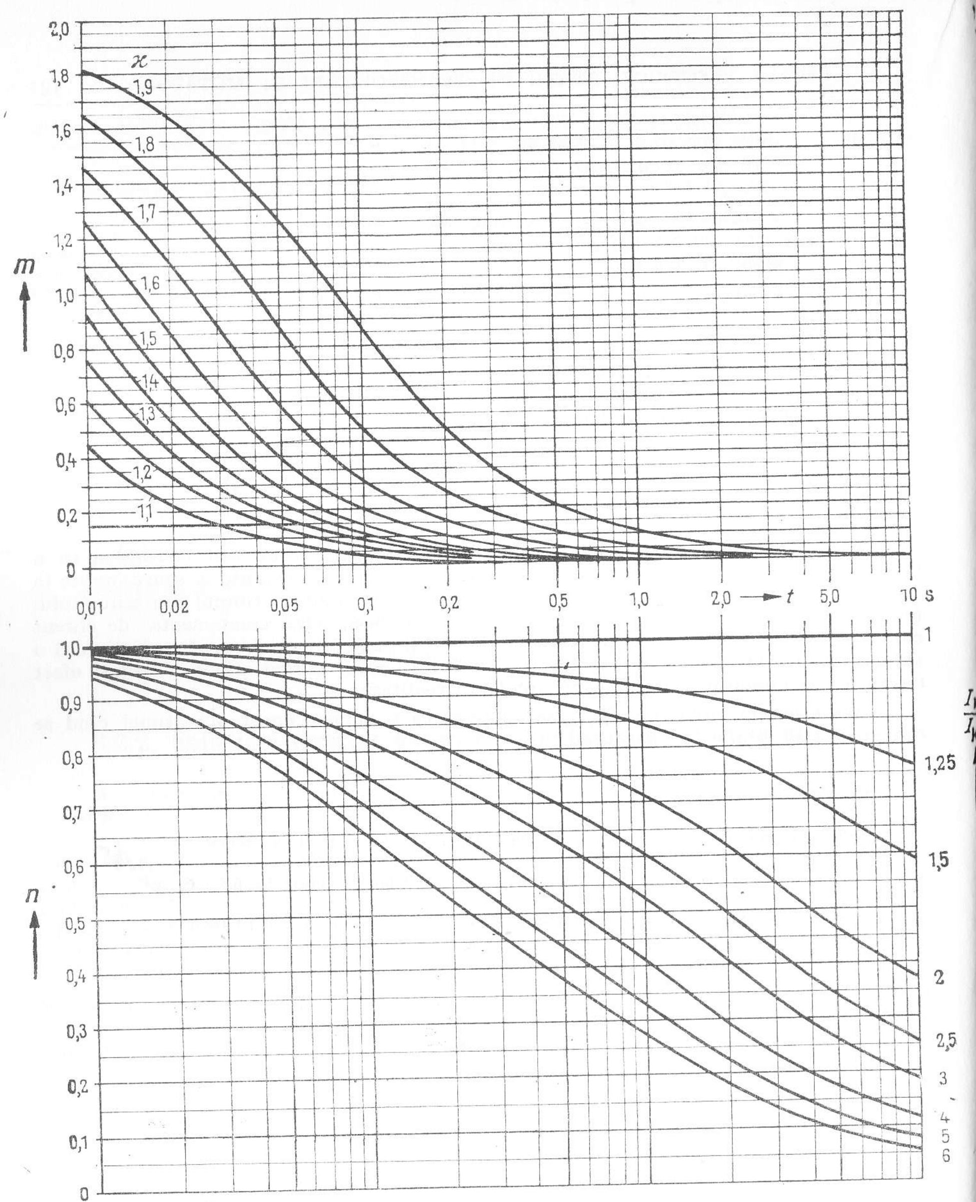


Fig. 8.13. Determinarea curentului mediu efectiv $I_{k\,med}$ în cursul regimului tranzitoriu al curentului de scu circuit, în legătură cu solicitarea termică:

m — influența componentei de curent continuu; n — influența componentei de curent alternativ.

Notă. Din diagramă se pot obține doi coeficienți de corecție m și n ca funcții de cantități cunosc (curentul inițial simetric de scurtcircuit I_k'', curentul permanent de scurtcircuit I_k și coeficientul $\varkappa$), care împ ună cu I_k'' permit calcularea curentului de scurtcircuit.

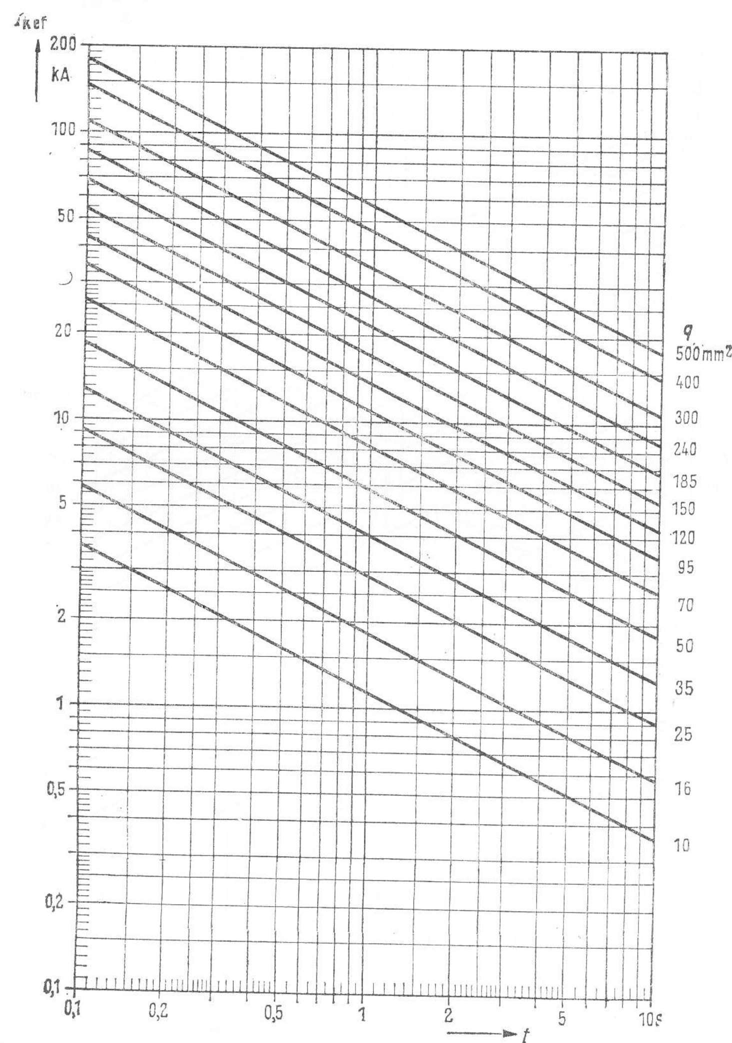


Fig. 8.14. Curenți de scurtcircuit limită termici pentru cabluri de cupru cu tensiuni de funcționare pînă la 6kV; la o temperatură inițială de sarcină de 65°C și o temperatură maximă de 160°C. $q = 8{,}7 \cdot I_k \cdot \sqrt{t}$ [mm².].

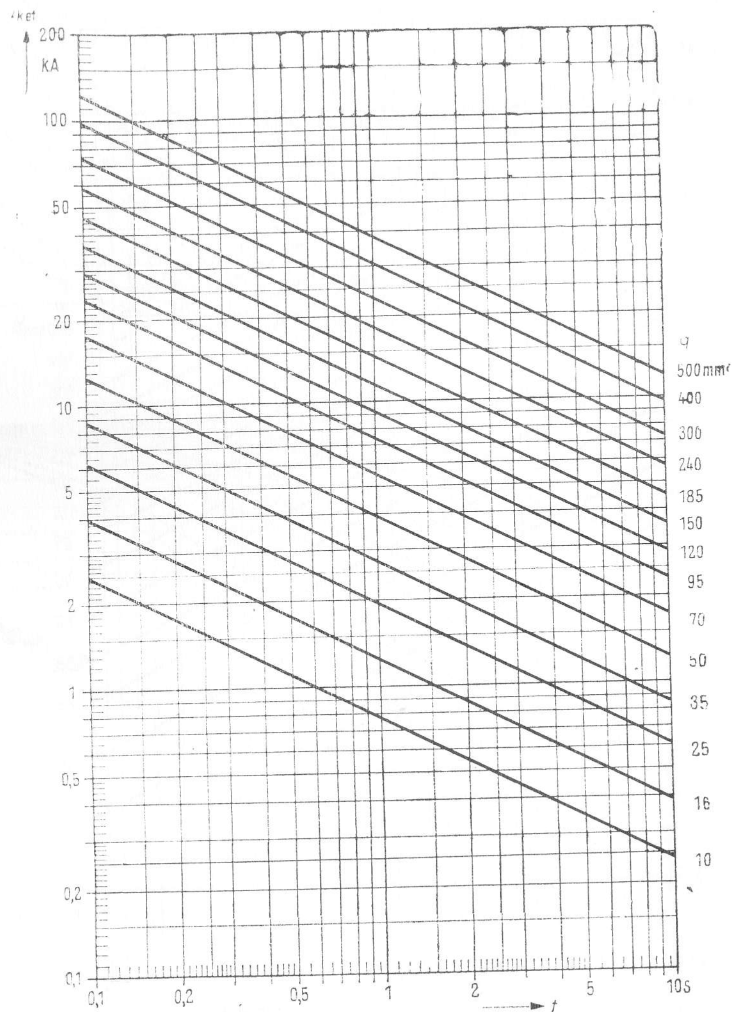


Fig. 8.15. Curenți de scurtcircuit limită termici pentru cabluri de aluminiu cu tensiuni de funcționare pînă la 6 kV, la o temperatură inițială de sarcină de 65°C și o temperatură maximă de 160°C. $q = 13{,}1\ I_k \cdot \sqrt{t}$ [mm²].

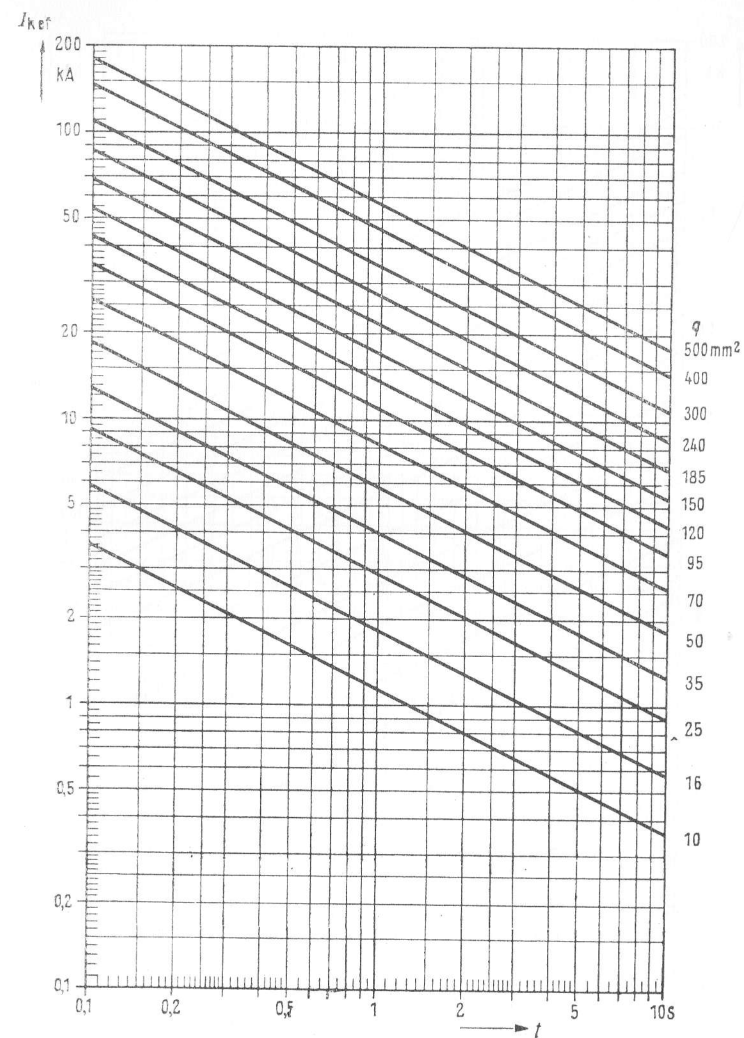


Fig. 8.16. Curenți de scurtcircuit limită termici pentru cabluri de cupru cu tensiuni de funcționare între 10 și 20 kV, la o temperatură inițială de sarcină de 55°C și o temperatură maximă de 140°C. $q = 9{,}0 \cdot I_k \cdot \sqrt{t}$ [mm²].

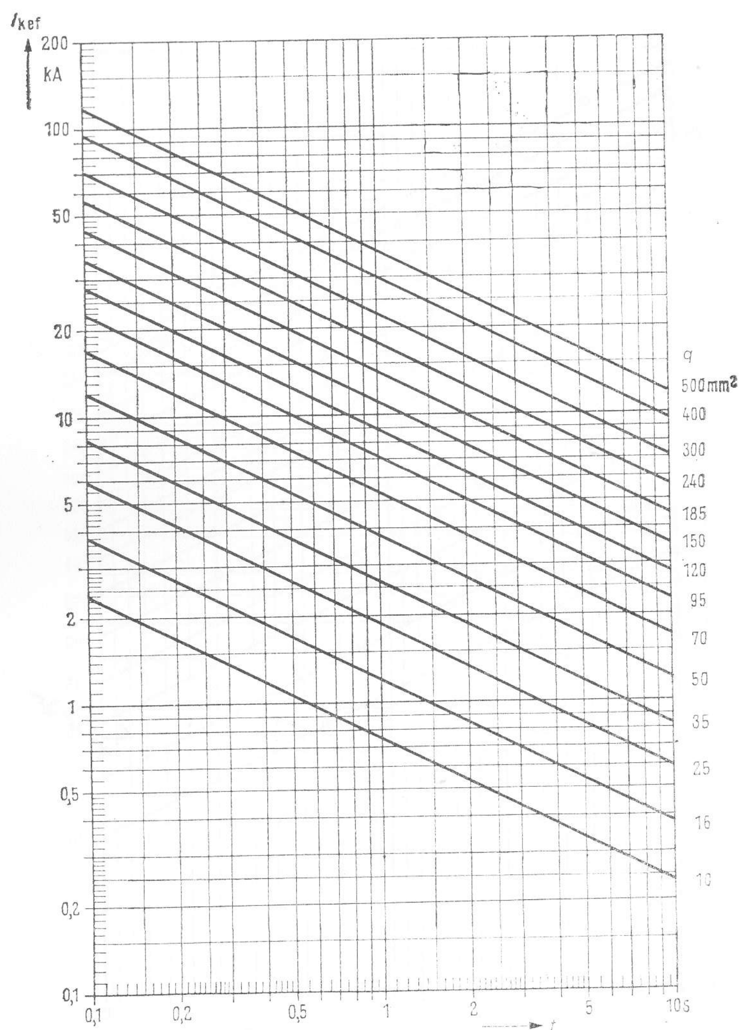


Fig. 8.17. Curenţi de scurtcircuit limită termici pentru cabluri de aluminiu cu tensiuni de funcţionare între 10 şi 20 kV, la o temperatură iniţială de sarcină de 55°C şi o temperatură maximă de 140°C · $q = 13{,}5 \cdot I_k \cdot \sqrt{t}$ [mm²].

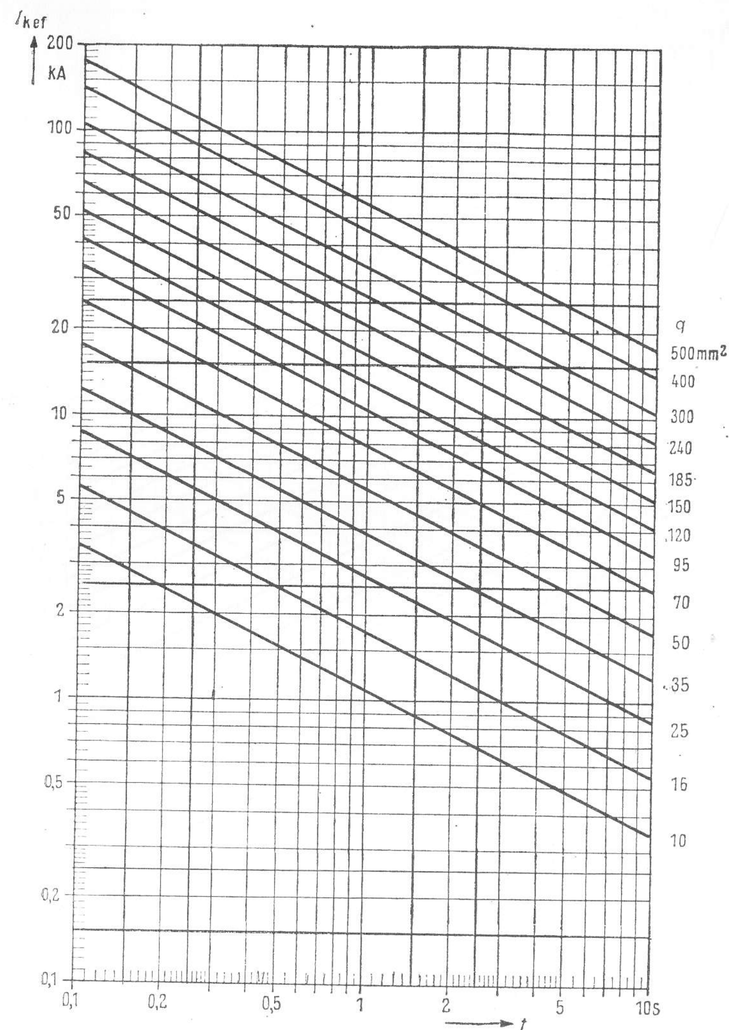


Fig. 8.18. Curenţi de scurtcircuit limită termici pentru cabluri de cupru cu tensiuni de funcţionare peste 20 kV, la o temperatură iniţială de sarcină de 45° C şi o temperatură maximă de 120°C.
$q = 9{,}3 \cdot I_k \cdot \sqrt{t}$ [mm²].

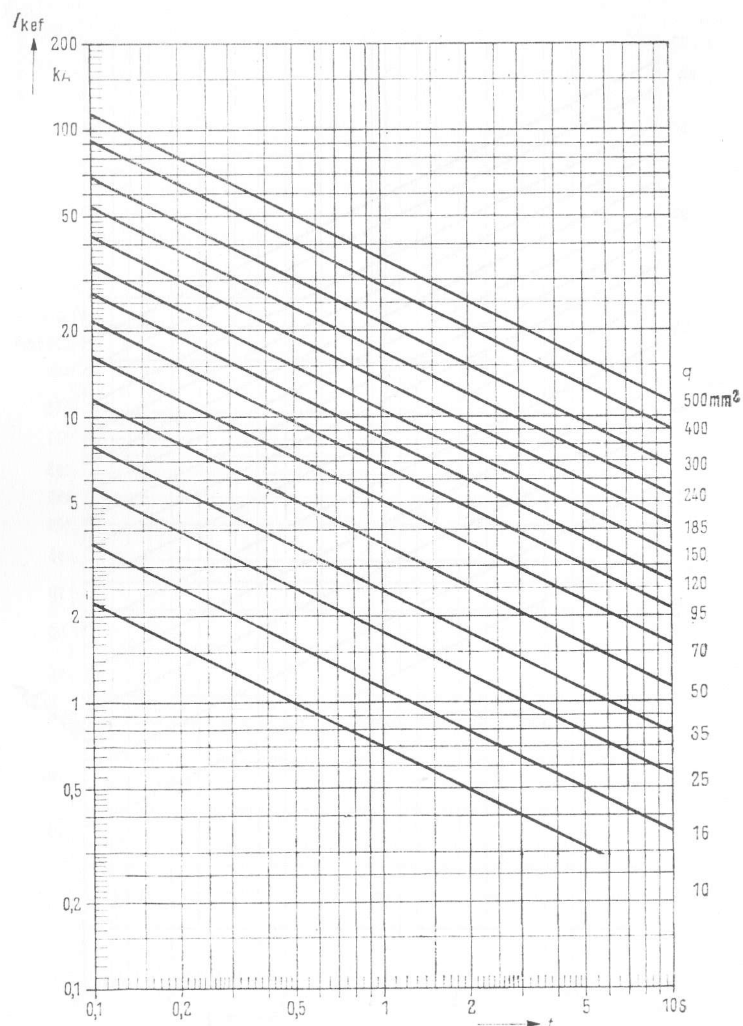


Fig. 8.19. Curenţi de scurtcircuit limită termici pentru cabluri de aluminiu cu tensiuni de funcţionare peste 20 kV, la o temperatură iniţială de sarcină de 45°C şi o temperatură maximă de 120°C. $q = 14 \cdot I_k \cdot \sqrt{t}$ [mm²].

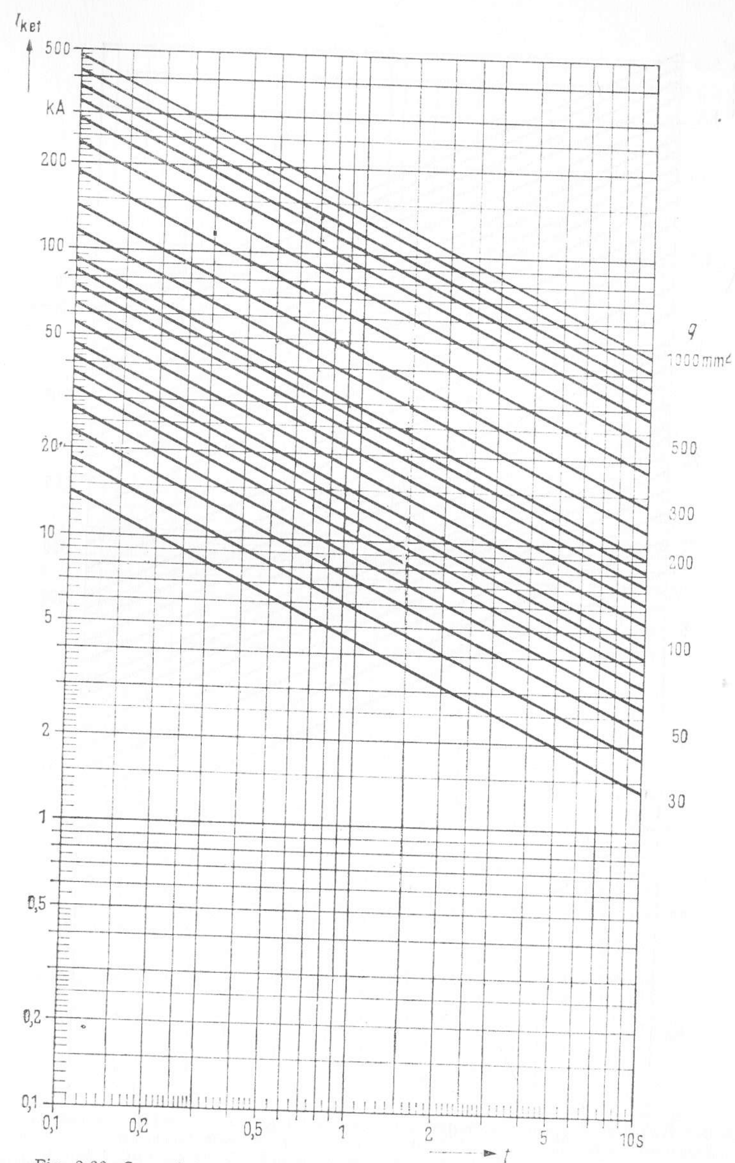


Fig. 8.20. Curenţi de scurtcircuit limită termici pentru conductoare neizolate de cupru, la o temperatură iniţială de sarcină de 50°C şi o temperatură maximă de 200°C. $q = 7 I_k \sqrt{t}$ [mm²]

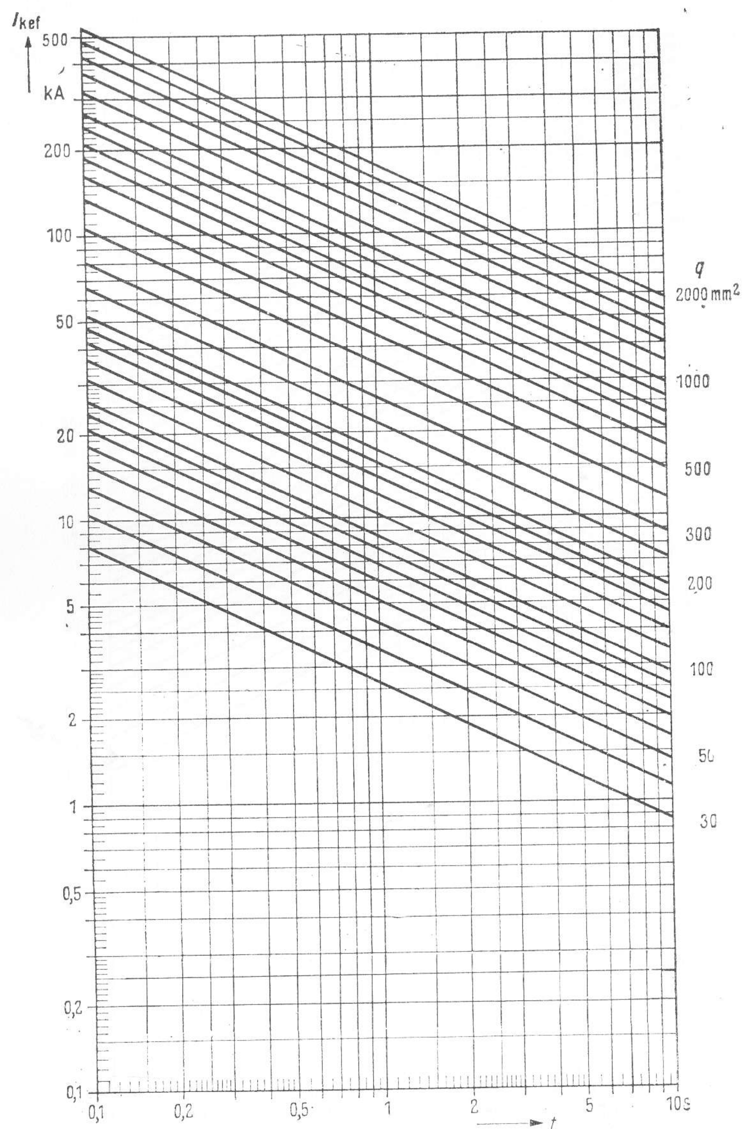


Fig. 8.21. Curenți de scurtcircuit limită termici pentru conductoare neizolate de aluminiu, la o temperatură inițială de sarcină de 50°C și o temperatură maximă de 180°C. $q = 11{,}2 \cdot I_k \cdot \sqrt{t}$ [mm²].

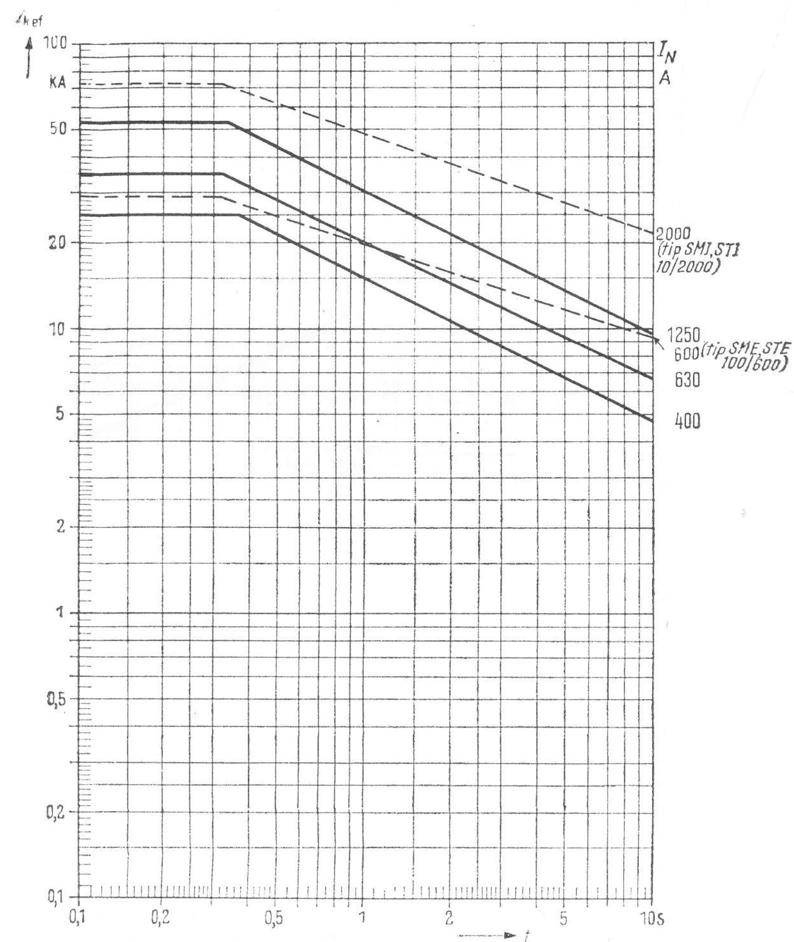


Fig. 8.22. Curenți de scurtcircuit limită termici pentru separatoare de tip H 244 și H 245 (linie plină) și pentru separatoare de fabricație românească tip SM și ST (linie întreruptă).

Separatoarele fiind stabile dinamic la valoarea curentului de șoc, mult mai mare decît $I_{k\,ef}$, pentru timpi reduși de deconectare, diagramele sînt limitate pentru valori constante ale lui I_k.

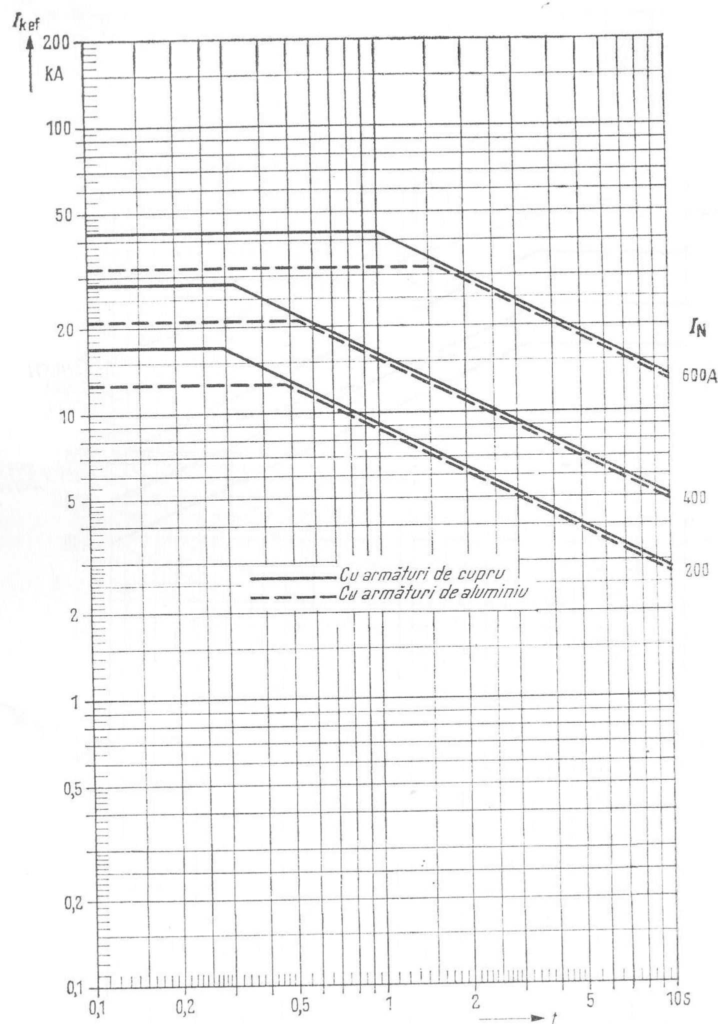


Fig. 8.23. Curenți de scurtcircuit limită termici pentru izolatoare de trecere. Separatoarele fiind stabile dinamic la valoarea curentului de șoc, mult mai mare decît I_{kef} pentru timpi reduși de deconectare, diagramele sînt limitate pentru valori constante ale lui I_k.

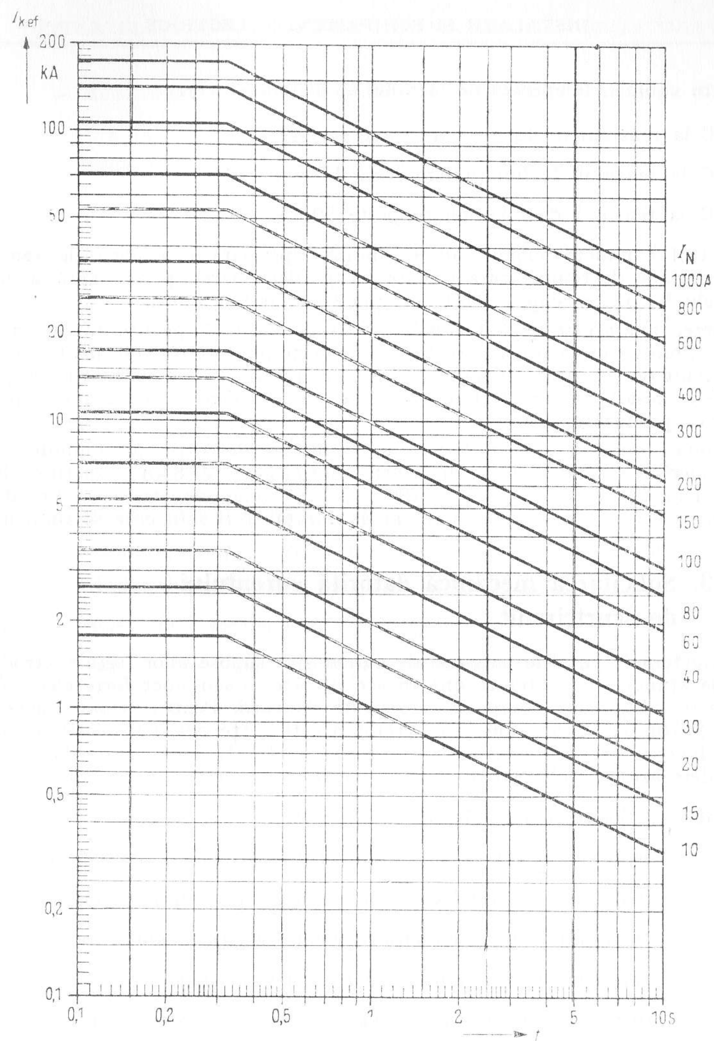


Fig. 8.24. Curenți de scurtcircuit limită termici pentru transformatoare de curent — performanța normală de scurtcircuit a transformatoarelor de măsură:

$$I_d = 250\ I_N;\quad I_t = 100\ I_N.$$

În cazul cînd valorile lui I_t și I_d sînt de z ori mai mari decît cele normale, curentul de scurtcircuit maxim admisibil I_k este și el de z ori mai mare.

Separatoarele fiind stabile dinamic la valoarea curentului de șoc, mult mai mare decît I_{kef}, pentru timpi reduși de deconectare, diagramele sînt limitate pentru valori constante ale lui I_k.

Pentru cabluri, temperaturile maxime admisibile sînt[1]):

160°C la tensiuni de funcţionare pînă la 6 kV;

140°C la tensiuni de funcţionare între 10 şi 20 kV;

120°C la tensiuni de funcţionare peste 20 kV.

În cazul conductoarelor neizolate, limita superioară a creşterii de temperatură este determinată de temperatura la care începe deformarea permanentă a metalului conductorului[2]), pentru cupru 200°C, iar pentru aluminiu 180°C.

Alegerea aparatelor după fig. 8.22... 8.24 se bazează pe rezultatele încercărilor efectuate. Limita superioară a curentului de scurtcircuit este determinată de curentul de scurtcircuit de şoc pentru aparatul respectiv. În cazul cînd aparatajul de producţie curentă este nesatisfăcător, trebuie să se execute, la cerere, o comandă specială de către fabrica producătoare.

Secţiunea minimă necesară pentru un conductor derivaţie, din aluminiu se determină considerînd un curent mediu de scurtcircuit $I_{k\ med} = 21{,}8$ kA şi un timp de rupere $t = 0{,}5$ s. Din fig. 8.21. rezultă $q = 180$ mm², secţiune care trebuie adoptată, chiar dacă pentru curentul de sarcină în regim de durată ar fi suficiente secţiuni mai mici.

8.2.3. Solicitarea mecanică datorită curentului de scurtcircuit

Conductoarele paralele parcurse de curent sînt supuse unor forţe electrodinamice. de atracţie atunci cînd curenţii sînt în acelaşi sens — sau unor forţe electrodinamice de respingere, atunci cînd curenţii au sensuri contrarii. Pentru valoarea acestor forţe v. relaţia (8.18). În cazul unui scurtcircuit aceste forţe pot deveni atît de mari încît efortul la încovoiere al conductoarelor precum şi solicitările de rupere, la compresiune şi la întindere asupra izolatoarelor necesită verificarea acestora prin calcul.

Simboluri folosite în formule (v. şi fig. 8.25)

A — secţiunea efectivă a conductorului principal (pe o fază), în cm²;

A_t — secţiunea fiecărei bare conductoare din pachet, în cm²;

A_e — secţiunea unui conductor derivaţie elastic (cablu), în cm²;

A_s — secţiunea unui conductor derivaţie rigid (bară), în cm²;

a — distanţa între conductoarele principale (faze), în cm;

a_{1t} — distanţa geometrică dintre prima şi cea de a t-a bară conductoare dintr-un pachet, în cm;

a_t — distanţa efectivă dintre conductoare, în cm;

[1]) Aceste temperaturi maxime admisibile se vor lua în considerare numai dacă nu există instrucţiuni în vigoare care să indice alte valori, în care caz diagramele 8.14 . . . 8.19 vor trebui corectate corespunzător.

[2]) În cazul cînd conductoarele sînt supuse şi la eforturi de tracţiune, temperatura maximă nu trebuie să depăşească 170°C pentru cupru, 160°C pentru OL—AL şi 130°C pentru aluminiu.

b — dimensiunea barei conductoare pe axa perpendiculară pe direcţia forţei, în cm;

c_1 — influenţa pieselor de distanţare asupra frecvenţei;

c_1' — influenţa pieselor de distanţare asupra frecvenţei în porţiunea $(l - l_a)$;

c_2 — influenţa masei şi a rigidităţii conductoarelor derivaţie asupra frecvenţei;

c_2' — influenţa masei şi a rigidităţii conductoarelor derivaţie asupra frecvenţei pe porţiunea $(l - l_a)$;

c_3 — influenţa coturilor la conductoare derivaţie asupra frecvenţei;

d — dimensiunea barei conductoare în direcţia forţei, în cm;

E — modulul lui Young în kgf/cm² (Cu: $E = 1{,}1 \cdot 10^6$ kgf/cm²; Al : $E = 0{,}65 \cdot 10^6$kgf/cm²);

e — numărul conductoarelor elastice (cabluri) derivaţie pe fiecare deschidere dintre două izolatoare suport;

F_h — forţa între conductoarele principale (faze) datorită curentului, în kgf;

F_t — forţa între barele pachetului datorită curentului, în kgf;

F_d — efortul pe izolator, în kgf;

F_N — sarcina maximă nominală a izolatorului, în kgf;

f — frecvenţa de lucru a circuitului, în s⁻¹;

f_0 — frecvenţa proprie a sistemului de conductoare, în s⁻¹;

f_{00} — frecvenţa proprie a unui conductor, în s⁻¹;

G — greutatea pieselor de distanţare, în kg;

g_t — greutatea barei conductoare, în kg/cm;

h — distanţa între punctul de aplicaţie al forţei şi suprafaţa de sprijin, în mm;

$\hat{i}_s$ — curentul de şoc (valoarea de vîrf), în kA;

J — momentul de inerţie al conductorului principal (de fază), în cm⁴;

J_t — momentul de inerţie al unei bare conductoare, în cm⁴;

J_e — momentul de inerţie al unui conductor elastic derivaţie, în cm⁴;

J_s — momentul de inerţie al unui conductor rigid derivaţie, în cm⁴;

k — numărul de piese de distanţare pe o deschidere de sprijin (între două izolatoare);
k_{1t} — coeficient de corecţie pentru distanţa efectivă a barelor conductoare;
l — distanţa dintre izolatoarele suport, în cm;
l_a — distanţa dintre un conductor derivaţie şi următorul punct de sprijin, în cm ($l_a \leqslant 0,5\ l$);
l_e — lungimea unui conductor derivaţie elastic, în cm;
l_s — lungimea unui conductor derivaţie rigid, în cm;
l_t — distanţa dintre punctul de sprijin şi piesa de distanţare alăturată, în cm;
l_{t1} — distanţa dintre două piese de distanţare învecinate, în cm;
s — numărul de conductoare derivaţie rigide pe o deschidere de sprijin;
t — numărul barelor conductoare din care se compune fiecare conductor (fiecare pachet);
u — factorul de asimetrie al conductorului derivaţie;
v_F — factor de frecvenţă pentru efortul în punctul de sprijin;
v_σ — factor de frecvenţă pentru efortul în conductor;
W — modul de rezistenţă al conductorului principal, în cm³;
W_t — modul de rezistenţă al barei conductoare, în cm³;
α — înclinarea unghiulară a conductorului derivaţie, în grd;
$\sigma_{0,2}$ — limita minimă de curgere a materialului, în kgf/cm²;
$\sigma'_{0,2}$ — limita maximă de curgere a materialului în kgf/cm²;
σ_h — efortul unitar în conductorul principal, în kgf/cm²;
σ_t — efortul unitar într-o bară conductoare din pachet, în kgf/cm².

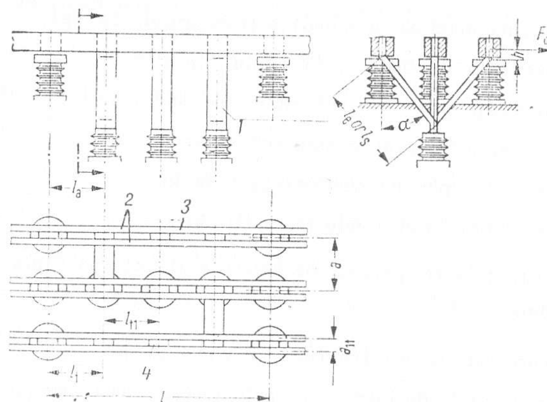


Fig. 8.25. Bare colectoare cu trei conductoare principale (faze) compuse fiecare din două bare conductoare cu conductoare derivaţie:
1 — conductor derivaţie cu l_e sau l_s şi A_e sau A_s; 2 — conductor principal; 3 — bară conductoare; 4 — piesă de distanţare.

Acţiunea forţei datorită curentului

Pentru a determina acţiunea forţei datorită curentului se aplică următoarea ecuaţie cantitativă;

$$F_h = 2,04 \cdot \hat{i}_s^2 \frac{l}{a} 10^{-2}\ \text{kgf}. \quad (8.18)$$

Această forţă este uniform distribuită de-a lungul distanţei de sprijin l, care este fie deschiderea unui conductor care trece prin mai multe puncte de sprijin, fie lungimea unui conductor fixat la ambele capete. Excepţiile faţă de aceste moduri de fixare, care apar de exemplu în cazul introducerii unor legături elastice sau în cazul deschiderilor de la capăt ale conductoarelor cu suporţi multipli, sînt în general de importanţă redusă şi de aceea nu se vor trata.

Efortul unitar în conductoare

Efortul în conductoare rezultă din însumarea efortului din conductoarele principale, datorit forţei dintre conductoarele principale (fazele) circuitului, cu efortul din barele conductoare ale pachetului produs de acţiunea forţelor dintre aceste bare (în cazul realizării conductoarelor principale din pachete de bare), (fig. 8.25).

Efortul unitar în conductoarele principale

Dacă se consideră că forţa conform ecuaţiei (8.18) acţionează sub forma unor pulsaţii, sau periodic, cu un factor de frecvenţă v_σ, ecuaţia

$$\sigma_h = v_\sigma \frac{F_h l}{12W} = v_\sigma \frac{1,7 \cdot 10^{-3}\ \hat{i}_s^2\ l^2}{aW}\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad (8.19)$$

este valabilă pentru efortul în conductoarele principale.

Factorul de frecvenţă la curent continuu

Acest factor are valoarea $v_\sigma = 2$, deoarece atunci cînd există un impuls de curent continuu şi se neglijează timpul de creştere finită a curentului, efortul este dublu faţă de cel care apare atunci cînd există o sarcină de durată.

Factorul de frecvenţă la curent alternativ şi circuite trifazate

Valoarea lui este $v_\sigma \leqslant 1$. Pentru simplificarea calculelor, se consideră mai întîi $v_\sigma = 1$. Numai în cazul cînd, în urma verificării efortului în conductoare se găseşte că acesta este prea mare, se poate determina, cu ajutorul raportului de frecvenţe şi cu fig. 8.28, dacă $v_\sigma < 1$. De aici se poate determina frecvenţa proprie a sistemului de conductoare, conform paragrafului intitulat „Capacitatea de oscilaţie" (pag. 443).

Modulul de rezistenţă W al conductorului principal (fază). În cazul conductoarelor principale multiple (pachete de conductoare) modulul de rezistenţă W este egal cu suma modulelor de rezistenţă W_t ale barelor conductoare atunci cînd solicitarea apare conform fig. 8.26, *a* sau cînd solicitarea este conformă cu fig. 8.26, *b*

şi grupul de conductoare este asamblat prin cel mult o piesă de întărire (piesele de distanţare împiedicînd ca barele conductoare să fie deplasate una spre cealaltă). Dacă efortul este conform fig. 8.26, b şi conductoarele sînt unite prin mai multe piese de întărire, mai mult sau mai puţin egal distribuite de-a lungul lungimii l, atunci pentru

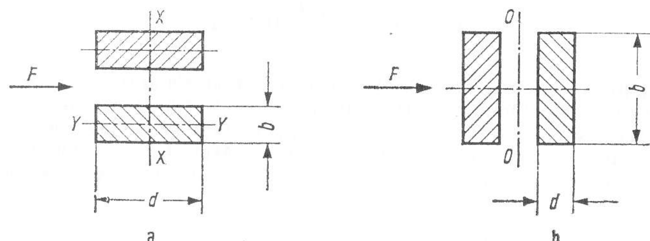


Fig. 8.26. Direcţia forţei şi axele de încovoiere în cazul unui pachet de conductoare.

pachetele de conductoare cu secţiune dreptunghiulară, modulele de rezistenţă din ecuaţia (8.19) raportate la axa $o-o$ se vor reduce la 60% ; pentru pachetele de conductoare cu secţiune din profile se vor reduce la 50%. Pentru secţiuni tip se dau astfel de module de rezistenţă în tabelul 8.4 a.

Tabelul 8.4 a. **Valorile lui W, în cm³, pentru conductoare principale asamblate prin cel puţin două piese de întărire**

Dispoziţia barelor colectoare	Conductor dreptunghiular (plat)							
	40×10	50×10	60×10	80×10	100×10	120×10	160×10	200×10
F_h →	3,5	4,3	5,2	6,9	8,7	10,4	13,9	17,4
F_h →	7,9	9,9	11,9	15,8	19,8	23,8	31,7	39.6
F_h → * 50	6,9	8,7	10,4	13,9	17,3	20,8	27,7	34,7
	Bare din profile							
	[6	[8	[10	[12	[14	[16	[18	[20
F_h →	12,7	27,9	41,5	74	113	162	224	300

*) În această dispoziţie se prevăd distanţoare numai între barele foarte apropiate între ele.

Solicitarea barelor conductoare din pachete

Prin analogie cu ecuaţiile (8.18) şi (8.19), expresia

$$F_t = 2{,}04\left(\frac{\hat{i}_s}{t}\right)^2 \frac{l_t}{a_t}\cdot 10^{-2}\ \text{kgf}, \tag{8.20}$$

este valabilă pentru forţa dintre barele conductoare, iar expresia

$$\sigma_t = v_\sigma \frac{F_t\, l_t}{12\, W_t} = \frac{v_\sigma\cdot 1{,}7\cdot 10^{-3}\,\hat{i}_s^2\cdot l_t^2}{a_t\cdot W_t\cdot t^2}\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \tag{8.21}$$

este valabilă pentru efortul n bara conductoare.

Factorul de frecvenţă în curent continuu

Ca şi în cazul efortului în conductoarele principale, acest factor are valoarea $v_\sigma = 2$

Factorul de frecvenţă în curent alternativ şi pentru curent trifazat

Spre deosebire de efortul în conductorul principal, factorul de frecvenţă este totdeauna $v_\sigma = 1$. Nu este posibil ca $v_\sigma < 1$ pentru că, datorită distanţei reduse dintre barele conductoare a_t, distanţa pînă la plăcuţa intermediară l_t rămîne de asemenea redusă, determinînd astfel un puternic efect de rezonanţă între frecvenţa conductorului şi frecvenţa forţei ($f_0 > f$).

Distanţa efectivă dintre barele conductoare a_t. În ecuaţiile (8.20) şi (8.21) distanţa a_t nu mai este egală cu distanţa dintre axele barelor conductoare atunci cînd barele conductoare se află la foarte mică distanţă una de cealaltă. În realitate

$$\frac{1}{a_t} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \cdots + \frac{k_{1t}}{a_{1t}}, \tag{8.22}$$

valorile, pentru k_{1t} fiind date în fig. 8.27.

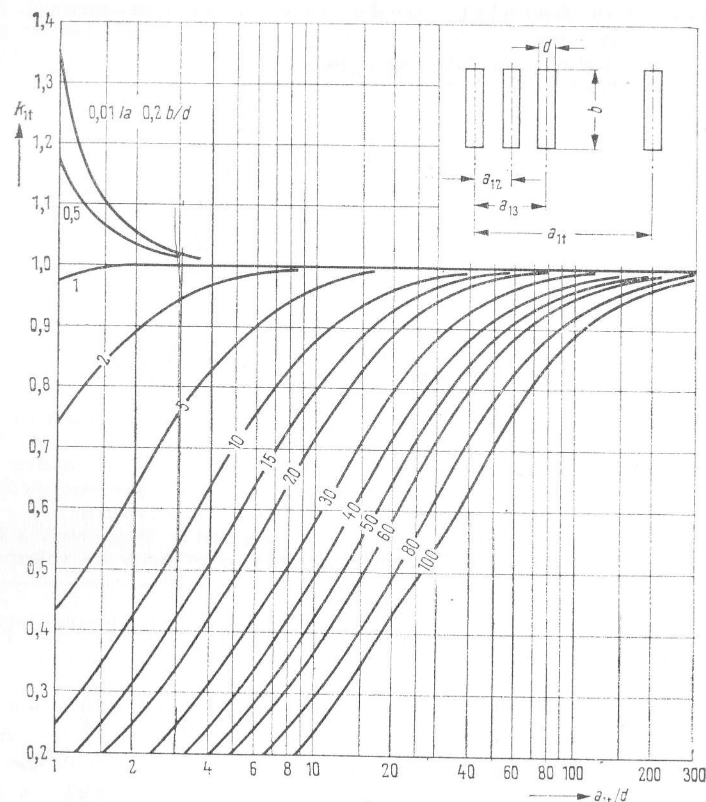


Fig. 8.27. Factorul de colecție k_{1t} pentru distanța efectivă dintre barele conductoare.

Pentru celelalte secțiuni de conductor se dau valorile lui a_t în tabelul 8.4 b.

Tabelul 8.4 b. Distanța efectivă a barelor conductoare a_t, în cm

Dispoziția barelor colectoare	Grosimea barei conductoare d cm	Lățimea barei conductoare b, în cm							
		4	5	6	8	10	12	16	20
(două bare, d, b)	0,5 1	2,0 2,8	2,4 3,1	2,7 3,4	3,3 4,1	4,0 4,7	5,4	6,7	8,0

Tabelul 8.4 b (continuare)

Dispoziția barelor colectoare	Grosimea barei conductoare d cm	Lățimea barei conductoare b, în cm							
		4	5	6	8	10	12	16	20
(trei bare, d)	0,5 1	1,7	1,3 1,9	1,8 2,0	1,8 2,3	2,2 2,7	3,0	3,7	4,3
(două perechi de bare, d, 50)	0,5 1	1,74	1,4 1,8	1,5 2,0	1,8 2,2	2,0 2,5	2,7	3,2	
(profile, h, b)		Bare din profile							
		[6	[8	[10	[12	[14	[16	[18	[20
		7,9	9,4	10	12	14	16	18	20

Valorile date pentru a_t sînt valabile pentru [6, dacă $h = 8,5$ cm; pentru [8, dacă $h = 10$ cm; pentru [10... [20, dacă $b = h$.

Efortul unitar admisibil în conductor

Admițînd că săgeata permanentă reprezintă 3—5% din distanța l dintre suporți, conductoarele sînt suficient dimensionate pentru efortul electrodinamic la încovoiere, care apare numai momentan, dacă dublul valorii limitei elastice a materialului conductorului nu este depășit de suma eforturilor la încovoiere din conductorul principal și din bara conductoare din pachet

$$\sigma_h + \sigma_t \leqslant 2\,\sigma_{0,2}. \tag{8.23}$$

În cazul conductorului principal (al fazei) format dintr-un singur conductor, avem în mod analog

$$\sigma_h \leqslant 2\,\sigma_{0,2} \tag{8.23 a}$$

În cazul barelor colectoare compuse din pachete de bare conductoare, l_t, distanța dintre suport și piesa de distanțare următoare trebuie astfel aleasă încît efortul la încovoiere al barei conductoare, luat singur, să nu depășească limita elastică

$$\sigma_t \leqslant \sigma_{0,2}, \tag{8.24}$$

Distanța dintre două piese de distanțare trebuie să fie

$$l_{t1} \leqslant 1{,}2\, l_t \sqrt{\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_t}} \tag{8.25}$$

Deoarece acțiunea forței exercitată între barele conductoare are totdeauna tendințe de a le apropia, piesele de distanțare trebuie montate astfel încît să împiedice barele conductoare de a se lovi între ele.

În cazul cînd și piesele de distanțare trebuie să contribuie la mărirea modulului de rezistență al conductorului principal (fazei), ele trebuie să împiedice deplasarea longitudinală a conductoarelor unul față de celălalt și devin piese de întărire. Acesta este cazul în care piesele de distanțare sînt fixate prin buloane, nituire sau sudare la barele conductoare.

Tabelul 8.5. **Valori pentru limita de curgere** [5])

Tipul materialului	Produse semifinite					Limita de curgere	
	Bare plate		Profile	Țevi			
	Grosimea mm	Lățimea mm	Grosimea mm	Diametru mm	Grosimea peretelui mm	Valoarea minimă $\sigma_{0,2}$ kgf/cm²	Valoarea maximă $\sigma'_{0,2}$ kgf/cm²
E-Cu F 25	2...40	10...100	pînă la 14	oricare	pînă la 10	2000	2900
	5...30	>100...200 [1])					
E-Cu F 30	2...15	10...100	—	pînă la 160	pînă la 5	2500	3600
	2...12	>100...200 [2])					
E-Cu F 37	2... 3	10...100	—	pînă la 50	pînă la 3	3300	4000
	>3... 6	10... 50					
E-Al F 6,5	oricare	oricare	oricare	oricare	oricare	250	600
E-Al F 8 [3])	>5	>120	[4])	[4])	—	500	1100
E-Al F 8,5	pînă la 10	pînă la 120	—		—	700	950
E-Al F 10	pînă la 10	pînă la 60	—		pînă la 6	850	1250
E-Al F 13	pînă la 5	pînă la 40	—	—	pînă la 1,5	1000	1300
E-AlMgSi 0,5 F22	oricare	oricare	oricare	oricare	oricare	1600	2400

[1]) Grosime/lățime > 0,05; secțiune maximă 5000 mm².
[2]) Grosime/lățime > 0,05.
[3]) Presat conform unor procedee speciale de fabricație.
[4]) Secțiune peste 800 mm².
[5]) În STAS 392-66, pentru barele dreptunghiulare de cupru cu secțiunea $\leqslant$ 500 mm² se prevede $\sigma_{min} = 25$ kgf/mm²; pentru barele dreptunghiulare de cupru cu secțiunea > 500 mm² se prevede $\sigma_{min} = 24$ kgf/mm².

În STAS 391-66, pentru barele rotunde de cupru se prevede $\sigma_{min} = 2500$ kgf/cm².
În STAS 3322-66, pentru barele dreptunghiulare de aluminiu E, jumătate tare pînă la 3 mm grosime se prevede $\sigma_{min} = 1100$ kgf/cm², peste 3 mm grosime se prevede $\sigma_{min} = 800$ kgf/cm².

Notă. σ_{min} — reprezintă rezistența de rupere la tracțiune.

Capacitatea de oscilație

Conductoarele și izolatoarele au tendințe de oscilație. Pulsația constantă a curentului de scurtcircuit de curent continuu produce oscilații, iar scurtcircuitul în curent alternativ cu atît mai mult, deoarece, datorită componentei sale de curent continuu, produce nu numai forțe la dublul frecvenței de lucru, dar și la frecvența normală de lucru. Acest fapt este luat în considerație prin factorii de frecvență v_σ pentru efortul în conductor și v_F pentru efortul pe izolator. Factorii de frecvență sînt rapoarte care dau diferența dintre efortul produs ținînd seama de capacitatea de oscilație a sistemului de conductoare și valoarea calculată conform ecuației (8.18), care este identică cu forța datorită unui curent continuu constant după amortizarea șocului inițial.

C u r e n t c o n t i n u u

Atunci cînd există un impuls de curent continuu și se neglijează timpul finit de creștere a curentului, efortul în conductoare și izolatoare este dublu față de cel ce apare la o sarcină constantă. În consecință, așa după cum s-a arătat în ecuațiile (8.19) și (8.21), $v_\sigma = 2$, iar pentru efortul la izolatoare $v_F = 2$.

C u r e n t a l t e r n a t i v ș i t r i f a z a t

Forțele periodice din cazul curentului alternativ și al scurtcircuitelor trifazate dau naștere la oscilații în sistemul de conductoare și izolatoare. Deoarece un scurtcircuit are numai o durată scurtă, oscilația conductoarelor reprezintă un regim tranzitoriu compus din oscilații libere și forțate. Astfel, amplitudinea maximă de oscilație și deci eforturile cele mai mari, nu au un caracter brusc, ci se formează într-un număr de perioade. Valoarea lor este determinată de două elemente și anume de raportul dintre frecvența proprie a sistemului de conductoare și frecvența de lucru a circuitului — și de posibilitatea ca conductorul, care este un oscilator liniar la începutul oscilației, să devină în timpul oscilației un oscilator neliniar.

Primul din aceste două elemente s-a determinat cu suficientă exactitate prin calcul și măsurări pentru un oscilator liniar (adică un conductor care este solicitat numai pînă la limita de elasticitate) și este reprezentat în fig. 8.28 ca o curbă de frecvență (curbă de rezonanță) a factorilor de frecvență v_F și v_σ.

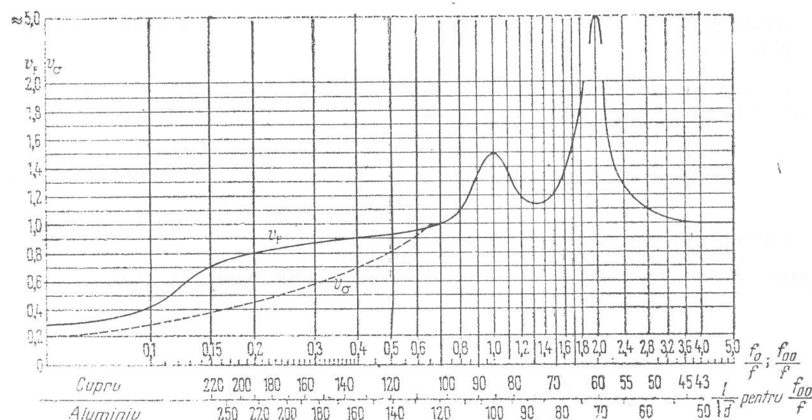


Fig. 8.28. Factorii de frecvență pentru scurtcircuite bi și trifazate pentru conductoare dispuse în același plan. Factoru de frecvență pentru reacțiunea izolatorului suport ν_F. Factorul de frecvență pentru efortul de încovoiere v_σ.

În ceea ce priveşte cel de al doilea element, s-au făcut, de asemenea, determinări prin măsurări. S-a stabilit că sistemul de conductoare devine un oscilator neliniar atunci cînd efortul de încovoiere este mai mare de 80% din limita de elasticitate a materialului conductor. Atunci cînd această valoare este depăşită (admisibil pînă la 2 $\sigma_{0,2}$), oscilaţiile se reduc considerabil, datorită plasticităţii materialului conductor şi frecvenţa proprie variază, astfel încît amplitudinile oscilaţiilor maxime liniare nu sînt depăşite. Factorii de frecvenţă din fig. 8.28 nu mai sînt deci valabili dacă sînt mai mari ca 1. Condiţiile pentru factorii de frecvenţă sînt următoarele:

– În cazul cînd $\sigma_h + \sigma_t < 0{,}8\,\sigma'_{0,2}$, factorii de frecvenţă pot atinge valoarea maximă

$$v_F = (v_\sigma =)\ \frac{0{,}8\sigma'_{0,2}}{\sigma_h + \sigma_t}, \tag{8.26}$$

cu condiţia de a se lua $v_F = 5$ pentru valori $v_F > 5$ ca în fig. 8.28.

– În cazul cînd $\sigma_h + \sigma_t \geqslant 0{,}8\ \sigma'_{0,2}$, factorii de frecvenţă sînt cel mult

$$v_F = (v_\sigma =)\ 1. \tag{8.27}$$

În cazul cînd se renunţă la determinarea frecvenţei aşa cum va fi descrisă mai jos, trebuie luate în consideraţie aceste valori. Atunci cînd se cunoaşte raportul frecvenţelor este valabilă fig. 8.28, cu condiţia ca valorile extrase din aceasta să fie mai mici decît cele calculate prin folosirea ecuaţiilor (8.26) şi (8.27). În cazul cînd $v_\sigma < 1$, această valoare introdusă în ecuaţia (8.19) înlocuieşte ipoteza că $v_\sigma < 1$.

Calculul raportului de frecvenţe

În cazul cînd conductorul şi punctul de sprijin sînt rigid fixate, raportul de frecvenţe este

$$\frac{f_0}{f} = \frac{f_{00}}{f}\, c_1 c_2 c_3. \tag{8.28}$$

(Dacă punctele de sprijin sînt elastice avem cazul unui lanţ oscilator compus din două porţiuni).

Frecvenţa caracteristică a unei singure secţiuni a conductorului principal

$$f_{00} = \frac{112}{l^2}\sqrt{\frac{E \cdot J_t}{g_t}}\ \mathrm{s}^{-1}. \tag{8.29}$$

Introducînd constantele materialului, se obţin expresiile simple de mai jos pentru raportul $\frac{f_{00}}{f}$ în cazul conductoarelor de cupru şi aluminiu, cînd $f = 50$ Hz,

$$\text{cupru: } \frac{f_{00}}{f} = \frac{2{,}49}{l^2}\sqrt{\frac{J_t}{A_t}} \cdot 10^4,$$

$$\text{aluminiu: } \frac{f_{00}}{f} = \frac{3{,}42}{l^2}\sqrt{\frac{J_t}{A_t}} \cdot 10^4.$$

Pentru secţiunile dreptunghiulare vezi scara $l/\sqrt{d}$ din fig. 8.28.

Influenţa pieselor de distanţare

Influenţa pieselor de distanţare asupra raportului frecvenţelor se poate exprima printr-un factor c_1 care depinde de direcţia forţei, raportul masei $G/(tg_t l)$ şi numărul k al pieselor de distanţare. Acest factor se poate determina din fig. 8.29.

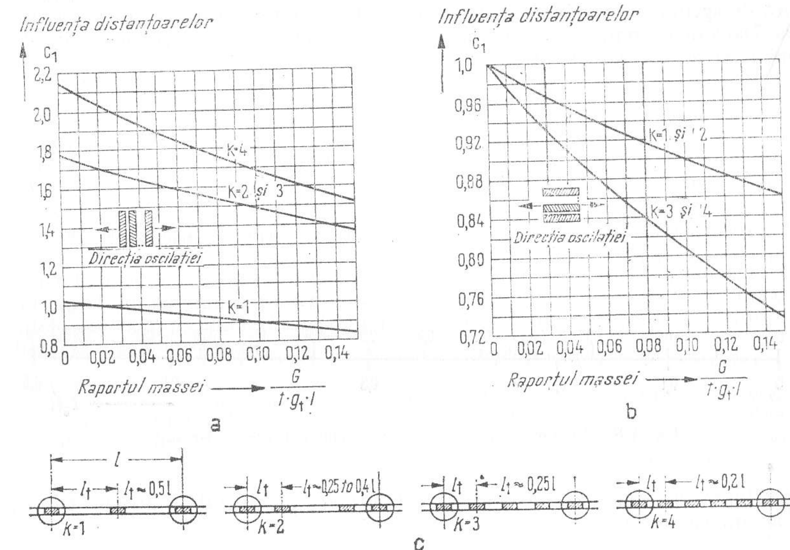


Fig. 8.29. Influenţa pieselor de distanţare dintre bare: *a* – direcţia de oscilaţie normală la suprafaţă; *b* – direcţia de oscilaţie în direcţia suprafeţei; orice direcţie a oscilaţiei (piesa de distanţare fără efect de piesă de întărire); *c* – dispoziţia pieselor de distanţare.

Influenţa masei şi rigidităţii derivaţiilor

$$c_2 = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{64}\sum_s (J_s/J)(l/l_s)^3\, u_s + \frac{1}{16}\sum_e (J_e/J)\,(l/l_e)^3\, u_e}{1 + 0{,}6\sum_s (A_s/A)(l_s/l)\, u_s + \sum_e (A_e/A)(l_e/l)\, u_e}}. \tag{8.30}$$

Un conductor de derivaţie este considerat rigid, caracteristicile sale primind indicele s, atunci cînd momentul său de inerţie este aproximativ egal cu momentul de inerţie al conductorului principal şi lungimea sa este mai mică sau egală cu 0,6 din distanţa de sprijin, sau cînd momentul său de inerţie este mai mic decît momentul de inerţie al conductorului principal şi lungimea sa mai mică sau egală cu 0,3 din distanţa de sprijin.

Pentru determinarea momentului de inerție al conductorului principal sînt valabile aceleași condiții ca și cele date pentru modulul de rezistență al conductorului principal.

În cazul cînd un conductor derivație nu îndeplinește nici una din aceste două condiții, el este considerat ca *elastic* și caracteristicile sale primesc indicele e. Conductoarele derivație a căror categorie se evidențiază în modul arătat sînt prinse în ecuația (8.30) sub semnul de însumare cu variabila corespunzătoare.

În cele mai frecvente cazuri, atunci cînd există un singur conductor pe fiecare distanță de sprijin, fie termenii sumei cu indicele s, fie termenii cu indicele e sînt egali cu zero. Dacă de exemplu, există numai un singur conductor derivație pe fiecare distanță de sprijin și acesta este elastic, avem:

$$c_2 = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{16}(J_e/J)(l/l_e)^3 u_e}{1 + (A_e/A)(l_e/l)u_e}}.$$

Factorul de asimetrie u este dat în fig. 8.30. Distanța l_a este raportată la următorul punct de sprijin, astfel încît $l_a \leqslant 0,5\ l$.

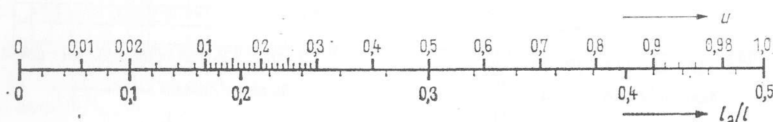


Fig. 8.30. Factorul de asimetrie u al conductoarelor derivație.

La limită, un conductor derivație rigid acționează integral ca un punct de sprijin. Cazul acesta are loc dacă

$$\sqrt[3]{\frac{J_s}{J}\frac{l}{l_s}} \geqslant 10. \tag{8.31}$$

Distanța de sprijin l se descompune în distanțele de sprijin l_a și $l - l_a$, astfel încît pentru aceste distanțe trebuie să se indice rezistența mecanică la scurtcircuit. În cazul cînd condiția (8.31) nu este îndeplinită, conductoarele derivație mai preiau o parte din sarcina barelor colectoare. Gradul suplimentar de siguranță determinat de acest fapt nu se ia însă în considerație în general.

Factorul de influență al unei curburi a conductorului derivație este

$$c_3 = 1 + \left[\left(\frac{l}{l - l_a}\right)^2 \frac{c_1' \, c_2'}{c_1 \, c_2} - 1\right] \sin \alpha. \tag{8.32}$$

În această expresie c_1' c_2' reprezintă factorul de influență al elementelor existente în deschiderea $(l - l_a)$ și raportate la această deschidere (de exemplu piesă de distanțare, conductor derivație suplimentar).

Efortul unitar pe izolator

Sub acțiunea forței datorită curentului dată de ecuația 8.18 apare o forță rezultantă pe lungimea unei distanțe de sprijin. Conform legilor mecanicii și ținînd seama de paragraful „Capacitatea de oscilație" (pag. 443) efortul pe izolator este deci

de-a lungul conductorului

$$F_d = v_F \, F_h; \tag{8.33}$$

la capetele conductorului

$$F_d = \frac{1}{2} v_F \, F_h. \tag{8.33, a}$$

Pentru izolatoarele suport întărite, din rășină turnată, în fig. 8.31, și 8. 32 se dă sarcina de încovoiere maximă nominală în funcție de distanța pînă la punctul de aplicație al efortului h. Sarcina maximă de compresiune nominală pentru aceste izolatoare este $\geqslant 10$ t, iar sarcina maximă de întindere nominală este egală cu sarcina maximă de încovoiere nominală atunci cînd $h = 0$. Pentru cazul aplicării unui efort egal cu sarcina maximă nominală se dă o probabilitate statistică de distrugere a izolatorului de circa 5%. Chiar dacă se ține seama de faptul că apariția simultană a tuturor condițiilor nefavorabile la scurtcircuit constituie un caz relativ rar (de exemplu apariția scurtcircuitului în momentul trecerii tensiunii prin zero), totuși pentru a se obține un înalt grad de siguranță este necesar să se considere ca sarcină admisibilă pentru elementele de fixare, maximum 80% din sarcina maximă nominală. Probabilitatea de deteriorare este atunci $\leqslant 0,5\%$.

Exemplu

Să să verifice barele colectoare compuse din 2 (120 × 10) E—Al pentru 3000 A, ale unor circuite trifazate de înalată tensiune de la 10 kV și 50 Hz. Puterea inițială de scurtcircuit curent alternativ este $S_k'' = 500$ MVA. Curentul de scurtcircuit de șoc este $I_s = 73,5$ kA. Dispoziția barelor colectoare corespunde cu numărul de piese de distanțare, conform fig. 8.25. Din motive constructive se vor respecta următoarele dimensiuni:

- distanța dintre conductoarele principale (faze) $a = 21$ cm;
- distanța geometrică între barele colectoare din pachet $a_{1t} = 2$ cm;
- distanța dintre izolatoarele suport $l = 90$ cm;
- distanța dintre conductorul derivație și punctul de sprijin în cazul conductoarelor principale exterioare .... $l_a = 24$ cm;
- distanța între conductorul derivație și punctul de sprijin în cazul conductorului principal central .... $l_a = 45$ cm;
- lungimea conductorului derivație de la conductoarele principale exterioare 27,7 cm;
- lungimea conductorului derivație de la conductorul principal central .... 18 cm;
- unghiul cotului conductoarelor derivație exterioare........................ $\alpha = 50°$.

Rezolvare. Nu se prevăd piese de distanțare suplimentare pentru conductorul principal central. Deoarece capetele conductoarelor derivație pătrund în barele colectoare, numărul pieselor de distanțare este $k = 1$ iar $l_t = 45$ cm.

Conductoarele principale exterioare au o piesă de distanțare suport în mijloc, adică o piesă de distanțare suplimentară pentru $l_t = 45$ cm. În acest caz, deoarece și extremitatea conductorului derivație pătrunde în bara colectoare, $k = 2$. Greutatea piesei de distanțare este $G = 0,5$ kg.

Efortul unitar în conductoarele principale

Conductorul principal centra

Deoarece există o singură piesă de distanțare cu rol de întărire, $W = 2\ W_t$, în care $W_t = 2,0$ cm³ din tabelul de curenți admisibili DIN 43 670

$$\sigma_h = 1 \cdot \frac{1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 73,5^2 \cdot 90^2}{21 \cdot 2 \cdot 2,0} = 885 \text{ kgf/cm}.$$

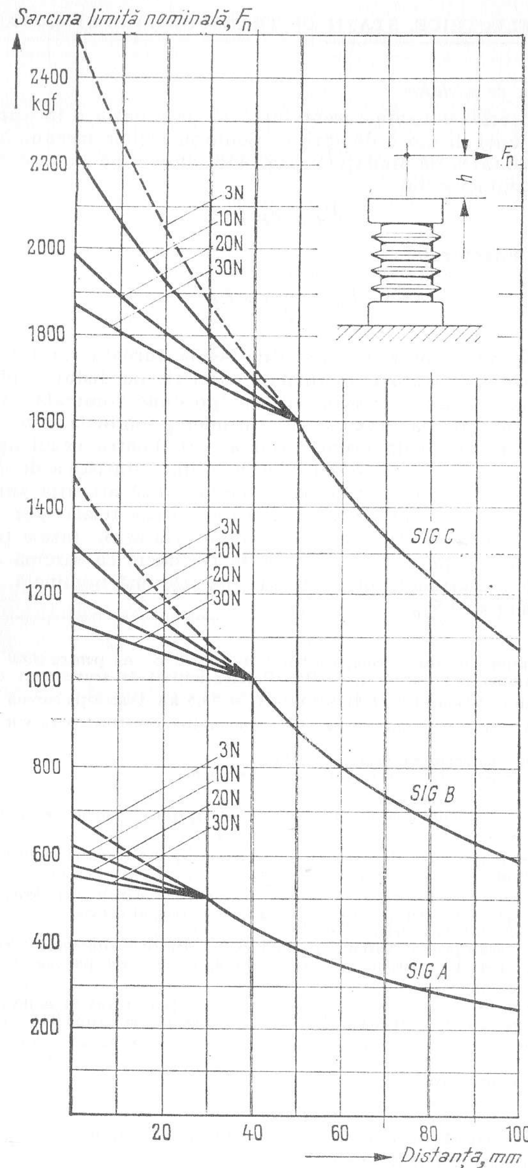


Fig. 8. 31. Sarcina de încovoiere maximă nominală pentru izolatoare suport întărite, din rășină turnată, seria 3 N pînă la 30 N.

Conductoarele principale exterioare

Piesele de distanțare sînt foarte neuniform distribuite pe deschiderea l, astfel încît pentru W este valabilă o valoare între 4 cm³ (distanțor) și 10,4 cm³ (tabelul 8.4, *a*). Alegînd W = 10,4 cm³, se obține

$$\sigma_h = 1 \cdot \frac{1{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 73{,}5^2 \cdot 90^2}{21 \cdot 10{,}4} = 340 \text{ kgf/cm}^2.$$

Deci

$$\sigma_h = 340 \text{ pînă la } 885 \text{ kgf/cm}^2.$$

Efortul unitar în bara conductoare din pachet

Pentru calculul efortului unitar se adoptă a_t din tabelul 8.4, *b*, W_t = 2,0 cm³ din tabelul de curen admisibili și se obține

$$\sigma_t = 1 \cdot \frac{1{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 73{,}5^2 \cdot 45^2}{5{,}4 \cdot 2 \cdot 2^2} = 430 \text{ kgf/cm}^2. \qquad \text{(v. 8.21)}$$

Pentru bare cu secțiune dreptunghiulară 120 × 10 E — Al, F 8,5 $\sigma_{0,2}$ — 700 kgf/cm² (tabelul 8.5) În conformitate cu aceasta,

$$\sigma_t < \sigma_{0,2} \qquad \text{(v. 8.24)}$$

și doarece, $\sigma_h + \sigma_t$ = (340 . . . 885) + 430 = 770 . . . 1315 kgf/cm²,

$$\sigma_h + \sigma_t < 2\,\sigma_{0,2}. \qquad \text{(8.23}$$

Deoarece $\sigma_h + \sigma_t > 0{,}8\ \sigma'_{0,2}$ = 760 kgf/cm²,

$$v_F = v_\sigma = 1. \qquad \text{(v. 8.27}$$

Efortul unitar pe izolator

$$F_d = 1 \cdot 2{,}04 \cdot 73{,}5^2 \cdot \frac{90}{21} \cdot 10^{-2} = 472 \text{ kgf} \qquad \text{(v. 8.18); (8.33)}$$

cu h = 90 mm (semilățimea barei $b/2$ = 60 mm, înălțimea armăturii suport de tip jug a barei 30 mm) Se alege izolatorul întărit din rășină turnată, de tip SIGB 10 N. Conform fig. 8.31 sarcina maximă nominală a acestui izolator pentru (h = 90) este F_h = 625 kgf, astfel încît sarcina admisibilă poate să ajungă la 0,8· 625 kgf = 500 kgf, valoare mai mare decît cea calculată pentru efortul pe izolator F_d.

Pentru conductoarele principale (fazele) exterioare s-a obținut v_F = 1, cu efortul maxim din bară determinat de l_t = 45 cm. În cazul cînd piesele de distanțare ar fi fost dispuse simetric în raport cu conductoarele derivație, adică la l_t = 24 cm, ceea ce ar fi fost favorabil pentru capacitatea de încărcare a conductorului principal, σ_t = 123 kgf/cm², $\sigma_h + \sigma_t$ = 463 kgf/cm² și, din ecuația (8.26) s-ar fi obținut v_F = 1.64.

Izolatoarele suport de tipul B ar fi deci necorespunzătoare. Totuși, s-ar putea realiza un factor de frecvență mai mic decît 1,64 pe baza raportului de frecvență din fig. 8.28. Acest lucru se analizează în cele ce urmează:

Luînd $l / \sqrt{d}$ = 90, conform fig. 8.28 se obține $\frac{f_{00}}{f}$ = 1,23.

Luînd $\frac{G}{t\, g_t\, l} = \frac{0{,}5}{2 \cdot 0{,}0324 \cdot 90}$ = 0,086, conform fig. 8.29, *a*.

Se obține din diagramă, pentru k = 2, c_1 = 1,52 (fig. 8.29, *a*).

Influenţa masei şi rigidităţii conductoarelor derivaţie asupra frecvenţei

Momentul de inerţie al conductorului principal

$$J = W\left(d + \frac{d}{2}\right) = 10{,}4 \cdot 1{,}5 = 15{,}6\ \text{cm}^4\ (W\ \text{din tabelul 8.4, } a).$$

Momentul de inerţie al conductorului derivaţie

Lungimea conductorului derivaţie este de 27,7 cm, valoare mai mare decît 0,3 l = 27 cm, ceea ce înseamnă că conductorul derivaţie se consideră elastic, cu u = 0,37 pentru l_a/l = 24/90 = 0,267 (fig. 8.30)

$$c_2 = \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{16}(0{,}5/15{,}6)\,(90/27{,}7)^3 \cdot 0{,}37}{1 + (6/24)\,(27{,}7/90) \cdot 0{,}37}} = 1{,}0 \qquad \text{(v. 8.30)}$$

Influenţa cotului derivaţiei asupra frecvenţei

Avînd $\frac{G}{t g_t (l - l_a)} = \frac{0{,}5}{2 \cdot 0{,}0324\,(90 - 24)} = 0{,}117$, pentru $k = 1$

(în deschiderea $l - l_a$), $c_1 = 0{,}89$ (fig. 8.29, *a*),

$$c_3 = 1 + \left[\left(\frac{90}{90 - 24}\right)^2 \frac{0{,}89 \cdot 1}{1{,}52 \cdot 1} - 1\right] \sin 50^\circ = 1{,}07 \qquad \text{(v. 8.32)}$$

Raportul frecvenţelor

$$\frac{f_0}{f} = 1{,}23 \cdot 1{,}52 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}07 = 2{,}0 \qquad \text{(v. 8.28)}$$

Factorul de frecvenţă

$$v_F \approx 5\ \text{(fig. 8.28)}.$$

Deoarece rezonanţa se produce la curentul de frecvenţă dublă, nu apare pericolul de a nu se atinge factorul de frecventă v_F = 1,64 determinat conform ecuaţiei (8.26); dimpotrivă, în cazu unu scurtcircuit cu $\hat{i}_s$ = 73,5 kA efectul de rezonanţă este limitat în mod considerabil. O dispoziţie simetrică a pieselor intermediare (l_t = 24 cm) în locul dispoziţiei asimetrice alese (l_t = 24 cm pentru conductorul derivaţie; l_t = 45 cm pentru piesa intermediară) ar duce la creşterea efortului la izolator cu 64% pentru conductoarele principale exterioare.

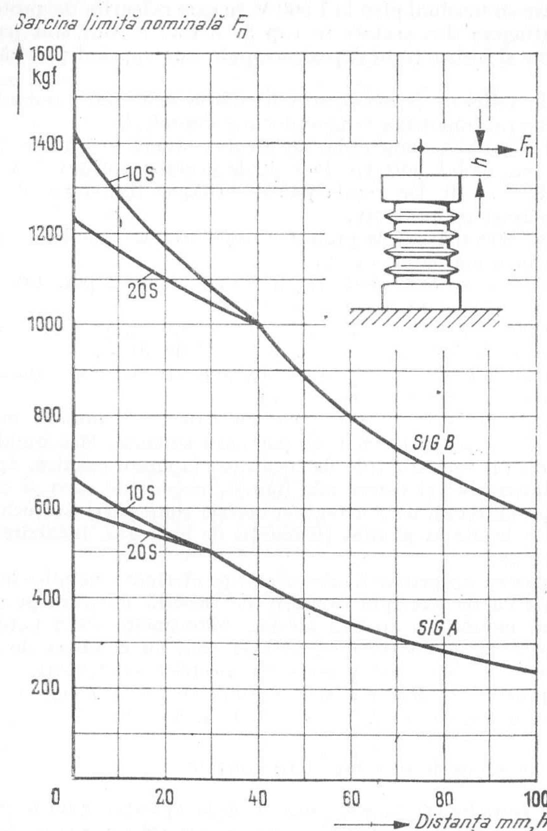


Fig. 8.32. Sarcina de încovoiere maximă nominală pentru izolatoare din răşină turnată, seria 10 S şi 20 S.

8.3. PROTECŢIA ÎMPOTRIVA TENSIUNILOR ACCIDENTALE ÎN INSTALAŢII DE CURENŢI TARI

8.3.1. Instalaţii cu tensiuni nominale pînă la 1 000 V

Prescripţiile în vigoare (normative, standarde, instrucţiuni) privind construcţia instalaţiilor şi echipamentelor energetice cu tensiuni pînă la 1000 V cuprind şi prevederi speciale referitoare la protecţia împotriva tensiunilor accidentale. Dintre acestea, principala prescripţie în vigoare în România cu caracter republican este Normativul C S C A S I 7-68 pentru proiectarea şi executarea instalaţiilor

electrice interioare cu tensiuni pînă la 1 000 V, în care măsurile de protecţie împotriva tensiunilor de atingere sînt tratate în cap 5. Aceste măsuri sînt particularizate în diferite normative şi instrucţiuni departamentale care cuprind precizări şi completări specifice.

În afară de astfel de prescripţii în România mai sînt standarde şi normative specifice de protecţie împotriva tensiunilor accidentale.[1]

Protecţiile împotriva tensiunilor accidentale diferă în funcţie de categoria utilajului electric: fix, mobil, portativ. Definiţiile acestor noţiuni sînt date în STAS 8275-68 pct. 1.8 ... 1.10. De regulă pentru utilajele fixe şi mobile se prevăd aceleaşi limite şi măsuri de protecţie.

Nu sînt necesare măsuri de protecţie împotriva tensiunilor de atingere pentru astfel de utilaje în următoarele cazuri:

— în locurile periculoase (definite în STAS 8275-68 pct. 1.6) dacă tensiunile nominale ale instalaţiilor sînt mai mici de 65 V;

— în locurile foarte periculoase (definite în STAS 8275-68 pct. 1.5) dacă tensiunile nominale ale instalaţiilor sînt mai mici de 40 V;

— în locurile foarte periculoase din excavaţiile subterane dacă tensiunile nominale ale instalaţiilor sînt mai mici de 24 V;

— la echipamentele cu tensiuni mai mari de 65 V pînă la maximum 250 V faţă de pămînt din încăperi normale cu pardoseli izolante, fără umiditate, praf, vapori corosivi etc., din construcţiile de locuinţe (aparate casnice, aparate de încălzire etc.), administrative şi comerciale (lămpi, maşini de scris şi calculat etc.), în care nu există posibilitatea de a atinge în acelaşi timp părţi din echipamentul electric fix şi obiecte legate la pămînt (instalaţii de apă, gaz, încălzire etc.) sau două utilaje electrice fixe;

— la echipamente electrice fixate solidar pe elemente metalice legate la o instalaţie de protecţie ca de exemplu: aparate de măsură montate pe stelaje metalice legate la pămînt, motoare şi aparate ale maşinilor-unelte, dacă batiul pe care sînt montate este legat la instalaţia de protecţie etc., cu condiţia de a se realiza un contact sigur între carcasele echipamentelor electrice şi elementele metalice legate la instalaţia de protecţie şi dacă nu există posibilitatea de a se face ineficace protecţia prin demontarea unora dintre aceste elemente metalice.

Sistemele de protecţie cele mai larg utilizate

Izolarea de protecţie are ca scop împiedicarea apariţiei unei tensiuni periculoase cînd un om atinge un echipament electric defect; această izolare este destinată exclusiv protecţiei împotriva tensiunilor accidentale şi se aplică suplimentar faţă de izolarea de lucru[2].

Izolarea de protecţie poate fi realizată prin:

— izolarea de protecţie a echipamentului electric;

— izolarea amplasamentului efectuată special pentru izolarea omului faţă de pămînt sau obiecte conductive în contact cu pămîntul aflate în zona de manipulare.

Izolarea de protecţie a echipamentului electric este de preferat izolării amplasamentului.

[1]) Normele Republicane de Protecţia muncii 1966, cap. VIII.
STAS 6616-1969 Instalaţii de legare la nul de protecţie.
STAS 6119-1968 Instalaţii de legare la pămînt de protecţie.
STAS 8275-1968 Protecţia împotriva electrocutărilor. Terminologie.
STAS 2612-1968 Protecţia împotriva electrocutărilor. Limite admisibile.

[2]) Prin izolare de lucru se înţelege izolarea normală prevăzută pentru buna funcţionare a echipamentului prin evitarea scurtcircuitelor, pierderilor de curent etc.

În cazul izolării de protecţie a unei maşini, toate părţile conductoare cu care se pot produce atingeri şi care în cazul unui defect pot primi în mod direct sau indirect tensiune, trebuie să fie prevăzute cu un înveliş (strat) rezistent şi durabil din material izolant.

Izolarea amplasamentelor în scopuri de siguranţă este admisibilă numai în cazul instalaţiilor fixe. Într-un asemenea caz, izolaţia trebuie să acopere atît pardoseala, cît şi orice elemente componente conductoare accesibile care sînt în contact cu pămîntul.

Tensiuni reduse de protecţie ($\leqslant 42$ V) se folosesc pentru a împiedica apariţia unor tensiuni de atingere periculoase. Circuitele de curent de pe partea tensiunii reduse trebuie să fie izolate faţă de pămînt şi să nu fie legate galvanic cu instalaţii cu tensiune mai ridicată (fig. 8.33).

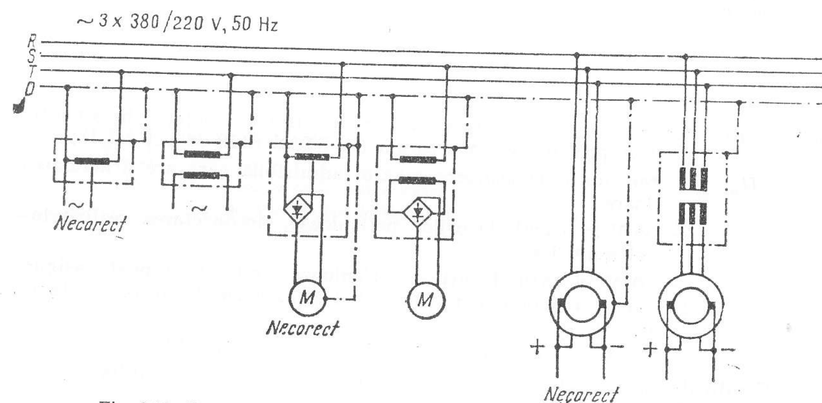


Fig. 8.33. Exemple de metode corecte şi incorecte de obţinere a tensiunilor reduse pentru protecţie.

Domeniu de aplicaţie: lămpi de iluminat şi unelte electrice portative folosite în locuri periculoase şi foarte periculoase cum sînt cele folosite în cazane, în medii umede, dispozitive electrice de comandă la distanţă nelegate la o instalaţie de protecţie, dispozitive cu încălzire electrică pentru tratament dermatologic sau pentru păr şi jucării electrice. La acestea din urma tensiunea maximă de alimentare este 24 V. Pentru alte categorii de utilaje şi locuri în care sînt folosite tensiuni reduse de alimentare sînt indicate în STAS 2612-68 şi Normativul I-7-68.

Tensiunile reduse se pot obţine din transformatoare cu înfăşurări separate din punct de vedere electric, grupuri convertizoare şi acumulatoare (acestea din urmă nu se vor încărca de la barele principale în timpul funcţionării).

Legarea la pămînt de protecţie este destinată să împiedice existenţă de durată mai mult de 3 s a unei tensiuni de atingere periculoase la părţile componente conducătoare care nu fac parte din circuitul de lucru. Ea se realizează prin conectarea elementelor componente respective la o instalaţie de legare la pămînt (fig. 8.34).

Rezistenţa de dispersie a acesteia se determină cu relaţia $R_p = \frac{U_a}{I_{def}}$,

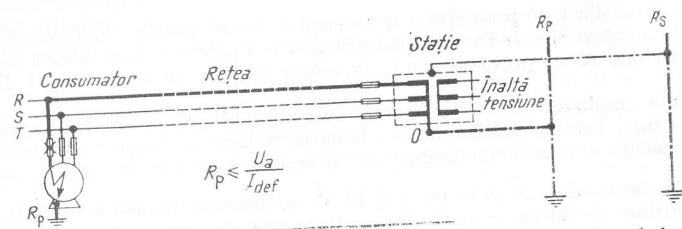


Fig. 8.34. Schema unei reţele la care punctul neutru este legat la pămînt; legarea la pămînt de protecţie:
I_{def} — curentul protecţiei maximale majorat cu un coeficient conform STAS 6119-68; R_p — rezistenţa instalaţiei de legare la pămînt a sistemului de joasă tensiune; R_s — legătura la pămînt de protecţie a părţii de înaltă tensiune.

unde: I_{def} este curentul de defect la care se deconectează sigur echipamentul defect prin protecţia acestuia (v. STAS 6119-68 pct 1.4.1);

U_a — tensiunea de atingere maxim admisibilă care are următoarea valoare:

— 65 V în cazul locurilor periculoase, deconectarea realizîndu-se în cel mult 3 s;

— 40 V în cazul locurilor periculoase cînd nu se poate asigura deconectarea în mai puţin de 3 s şi în cazul locurilor foarte periculoase;

— 24 V în cazul instalaţiilor din excavaţiile subterane.

Condiţiile de realizare a instalaţiilor de legare la pămînt de protecţie sînt date în STAS 6119-68.

Legarea la nul de protecţie are drept scop impiedicarea existenţei de durată a unor tensiuni de atingere periculoase pe părţile componente care nu fac parte din circuitul de lucru. Această protecţie necesită în instalaţia respectivă un punct neutru legat la pămînt printr-o rezistenţă neglijabilă şi se realizează prin legarea elementelor componente care trebuie protejate la conductorul de nul racordat la punctul de nul al reţelei. În reţelele şi instalaţiile în care se foloseşte legarea la nul de protecţie se admite şi legarea la pămînt de protecţie, folosind însă numai instalaţii de legare la pămînt care au legături directe cu conductoare de nul de protecţie din reţeaua respectivă.

Conductorul de nul trebuie să fie legat la pămînt în apropierea sursei de alimentare (generatorul sau transformatorul), iar în reţelele cu linii aeriene trebuie să fie legat şi la capătul fiecărei derivaţii din reţea (orice derivaţie cu lungimea de peste 200 m), precum şi pe traseu la anumite intervale. De asemenea se leagă la pămînt suplimentar bornele sau barele de nul ale tuturor tablourilor de distribuţie (generale, principale, intermediare şi secundare).

De regulă instalaţiile de legare la pămînt care deservesc instalaţia de legare de nul trebuie să aibă o rezistenţă de dispersie sub valoarea de 4Ω. Excepţie fac prizele de pămînt la care se racordează nulul reţelelor electrice aeriene. La acestea, dacă distanţa între două prize de pămînt este mai mare de 200 m, dar mai mică

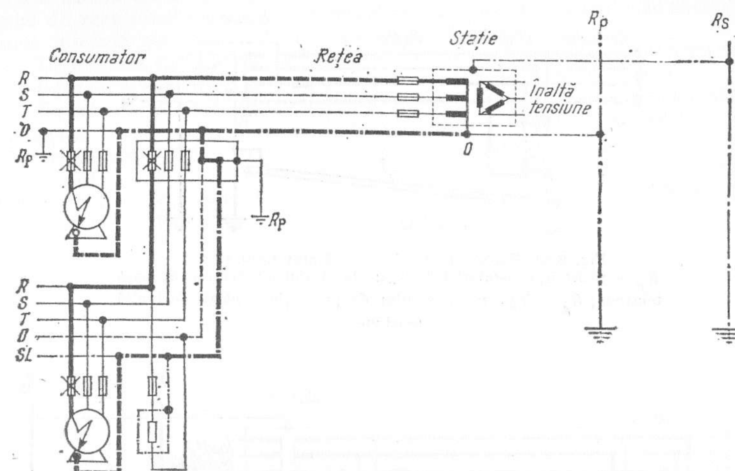


Fig. 8.35. Exemplu de folosire a legării la nul cu conductorul de nul de lucru separat de cel de legare la nul de protecţie.

de 500 m, rezistenţa de dispersie maximă trebuie să fie de 10Ω. Dacă această distanţă este mai mică sau cel mult egală cu 200 m rezistenţa de dispersie trebuie să fie sub 20Ω.

În afară de legarea la nul, la utilajele fixe sau mobile trebuie să se mai prevadă o măsură suplimentară de protecţie în următoarele cazuri întîlnite foarte des în instalaţiile de joasă tensiune (STAS 6616-69 pct. 4.6):

— pentru legarea la nul se foloseşte unul din conductoarele de aluminiu ale cablurilor;

— locul de muncă este periculos sau foarte periculos.

Ca măsură suplimentară de protecţie se poate aplica una din următoarele măsuri posibile:

— legarea la o instalaţie de legare la pămînt;

— executarea unor legături suplimentare între carcasele echipamentelor grupate în acelaşi loc;

— egalizarea potenţialelor în zona de manipulare;

— izolarea amplasamentelor în zona de manipulare;

— aplicarea unei protecţii automate împotriva tensiunilor de atingere (PATA) sau împotriva curenţilor de defect (PACD).

Pentru executarea instalaţiilor de legare la pămînt trebuie să se folosească de preferinţă prizele naturale cum sînt:

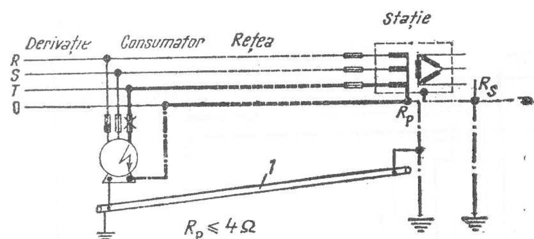


Fig. 8.36. Folosirea prizelor de pămînt naturale: R_p — rezistenţa instalaţiei de legare la pămînt a sistemului de joasă tensiune; R_s — legătura la pămînt de protecţie a părţii de înaltă tensiune.

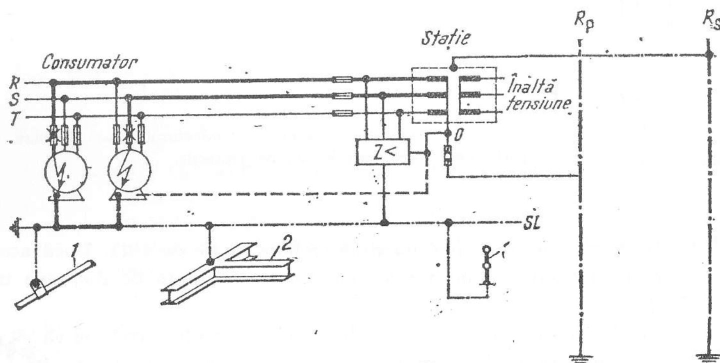


Fig. 8.37. Exemple de folosire a prizelor naturale: 0 — conductorul de nul; *SL* — conductor de legare la pămînt; *1* — sistem de alimentare cu apă; *2* — şarpanta metalică a clădirii; *3* — şină.

— armăturile metalice ale construcţiilor de beton armat;
— construcţii metalice cu caracter permanent;
— conducte metalice de apă îngropate;
— învelişurile metalice continue ale cablurilor electrice îngropate;
— ţevile metalice pentru foraje.

Sînt interzise conductele prin care trec fluide combustibile sau elemente care prin demontarea lor probabilă ar modifica condiţiile de protecţie.

O instalaţie de legare la pămînt la care se racordează barele sau bornele de nul ale tablourilor de distribuţie, poate fi folosită şi pentru legarea carcaselor echipamentelor electrice care trebuie legate la pămînt.

Construcţiile metalice ale clădirilor sau ale altor construcţii tehnologice constituite din elemente montate fix (cu caracter permanent) poate fi folosite şi drept conductoare de nul de protecţie dacă îndeplinesc condiţiile necesare de secţiune şi

continuitate. Se admite să fie neizolat conductorul de nul de protecţie numai pînă la ultimul tablou de distribuţie în sensul transportului de energie; în acest caz, indiferent de rezultatul calculului secţiunii în funcţie de condiţiile de deconectare, secţiunea minimă este 50 mm² oţel sau 16 mm² cupru.

De la acest tablou pînă la receptor conductorul de nul de protecţie va fi izolat şi protejat în aceleaşi condiţii ca şi conductoarele de fază (de lucru).

În cele de mai sus s-au menţionat unele din condiţiile principale ale protecţiei prin legare la nul. Restul condiţiilor sînt indicate în STAS 6616-69 şi normativele sau instrucţiunile departamentale. Dintre acestea din urmă se poate menţiona Normativul MEE 1 S-2-69 privind proiectarea şi execuţia instalaţiilor electrice sub 1 000 V şi Instrucţiunile MEEPE 121/70 privind proiectarea şi execuţia instalaţiilor de legare la pămînt.

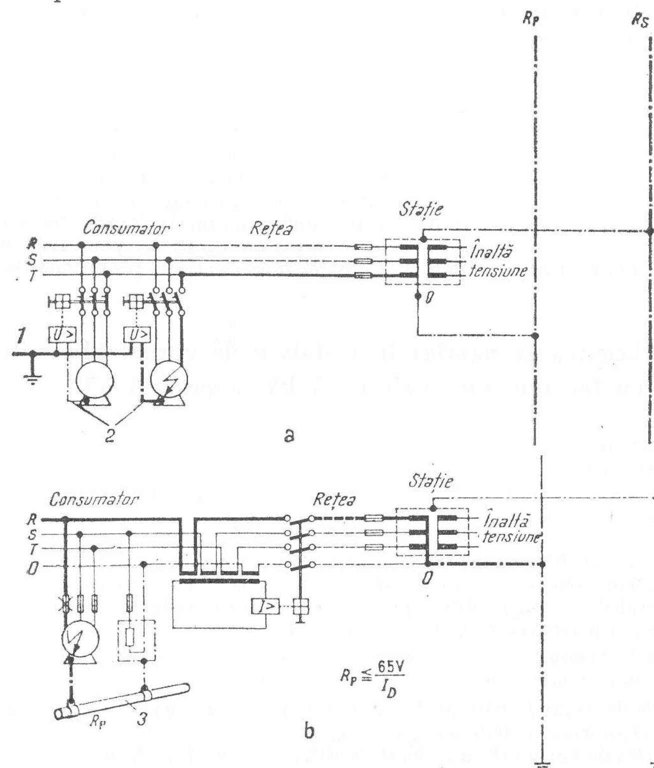


Fig. 8.38. Exemplu de sistem de protecţie prin deconectare automată: *a* — împotriva tensiunii de atingere; *b* — împotriva curentului de punere la pămînt: R_p — legătura la pămînt a sistemului de joasă tensiune; R_s — legătura la pămînt de protecţie a părţii de înaltă tensiune; *1* — priză auxiliară de pămînt; *2* — conductor de protecţie; *3* — sistem de alimentare cu apă; I_D — curentul limită de punere la pămînt (curentul de declanşare) al întreruptorului automat de curent de defect (PACD).

Protecţia automată împotriva tensiunilor de defect (PATD) are drept scop să împiedice existenţa de durată a unei tensiuni de atingere periculoase, pe un element conductor component al instalaţiei care nu face parte din circuitul de lucru, prin separarea rapidă (în interval de 0,2 s) a instalaţiei sau echipamentului defect la astfel de tensiuni. Ori ce conductor de nul care face parte din schemă va fi întrerupt în acelaşi timp.

Protecţia PATD se compune din întreruptorul automat, un releu de tensiune maximă, un dispozitiv de control al bunei funcţionări, conductorul de protecţie, conductorul auxiliar de legare la pămînt şi priza de pămînt auxiliară.

Electrodul prizei auxiliare trebuie să fie amplasat la o distanţă de minimum 10 m de alţi electrozi de legare la pămînt. Conductorul auxiliar de legare la pămînt trebuie să fie izolat corespunzător. Conductorul de protecţie nu trebuie să vină în atingere cu elemente componente conductoare, care nu fac parte din circuitul de lucru, al unor echipamente electrice la care legăturilor se întrerup în caz de defect cu ajutorul întreruptorului automat; în caz contrar conductorul de protecţie se va monta de asemenea cu izolaţie corespunzătoare.

Protecţia automată împotriva curenţilor de defect (PACD) are drept scop să împiedice existenţa de durată a unei tensiuni de atingere periculoasă pe elemente conducătoare componente ale instalaţiei, care nu fac parte din circuitul de lucru, făcînd ca un curent de defect, care depăşeşte o valoare predeterminantă, să întrerupă toate liniile de alimentare şi orice conductor de nul într-un interval de 0,2 s. Întreg echipamentul protejat de întreruptoare automate PACD se va racorda la o instalaţie de legare la pămînt, a cărei rezistenţă de dispersie trebuie astfel determinată, încît trecerea curentului de declanşare al întreruptorului PACD prin circuitul de legare la pămînt să nu provoace apariţia unei tensiuni de atingere, la echipamentele electrice, peste valorile admisibile.

8.3.2. Legarea la pămînt în instalaţii de curent alternativ cu tensiuni nominale de 1 kV şi peste 1 kV

Prescripţia de bază pentru astfel de instalaţii o constituie STAS 7334-70 [1]). Această prescripţie nu se referă la instalaţiile din excavaţiile subterane ale exploatărilor miniere, la instalaţiile din medii cu pericol de explozie şi la instalaţiile de tracţiune electrică, pentru care se vor respecta prescripţiile tehnice specifice instalaţiilor respective.

Legarea la pămînt de protecţie este legarea rigidă la pămînt a unui element conductor component al unui echipament sau instalaţii electrice care nu fac parte din circuitul de lucru, pentru a proteja personalul împotriva unei tensiuni de atingere şi de pas periculoase, în condiţii de defect.

Legarea la pămînt de exploatare este legarea la pămînt a unui element component al instalaţiei, care face parte din circuitul de lucru.

Exemple de legare la pămînt de exploatare (fig. 8.39): legarea la pămînt a punctelor neutre ale înfăşurărilor, a bobinelor de compensare, a punctului neutru al rezistenţelor, a conductoarelor de nul, a înfăşurărilor de înaltă tensiune a transformatoarelor de tensiune şi a condensatoarelor (legarea la pămînt a înfăşurărilor de înaltă tensiune ale transformatoarelor se poate executa la dispozitivul de legare la pămînt de protecţie al carcaselor şi cuvelor lor).

1) STAS 7334-70 **Instalaţii electrice de 1 000 V şi peste 1 000 V. Instalaţii de legare la pămînt de** otec ţie.

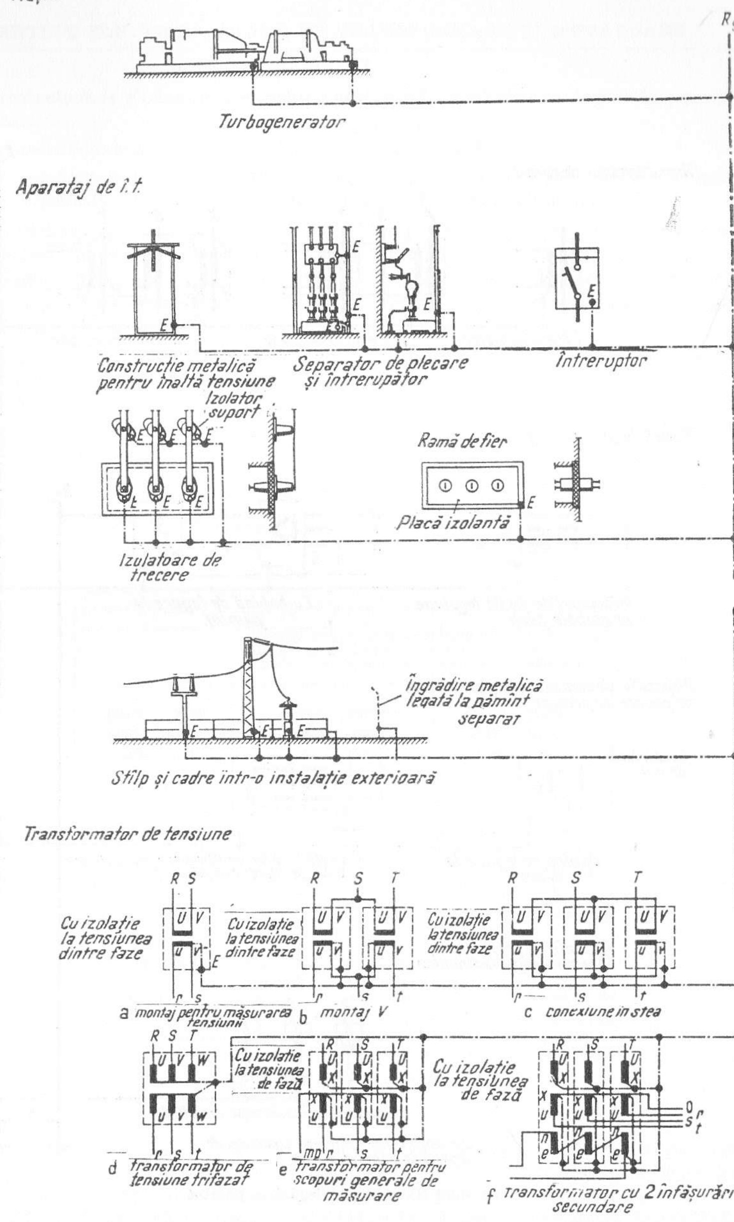


Fig. 8.39. Exemple de legări la pămînt.

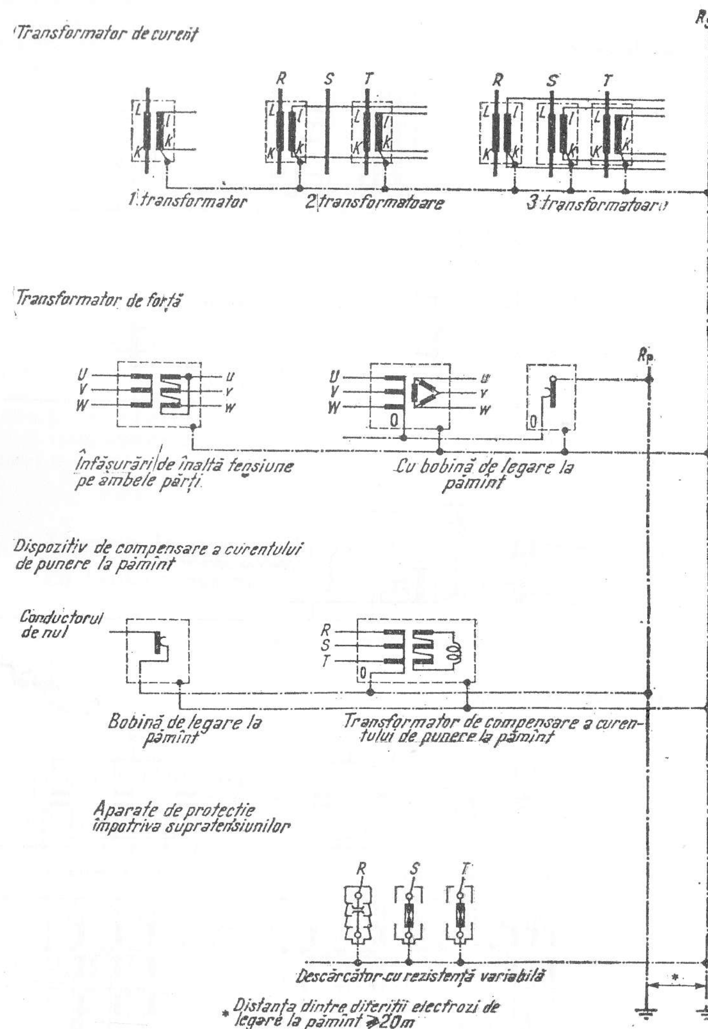


Fig. 8.39 Exemple de legări la pămînt

Conductoarele de legare la pămînt aparținînd instalației de legare la pămînt sînt următoarele:

— conductoarele principale de legare la pămînt;

— conductoarele de ramificație care stabilesc legăturile dintre elementele ce se leagă la pămînt și un conductor principal de legare la pămînt;

— conductoarele care stabilesc legăturile între conductoarele principale de legare la pămînt și prizele de pămînt respective.

Conductoarele de legare la pămînt trebuie să fie astfel dimensionate încît temperatura lor să nu depășească valoarea de 200°C în medii cu pericol de incendiu și 300°C dacă nu există un astfel de pericol.

În cazul rețelelor cu neutrul izolat sau cu compensarea curentului de punere la pămînt, conductoarele de legare la pămînt trebuie să fie dimensionate la solicitarea termică apărută în cazul unei duble puneri la pămînt (scurtcircuit bifazat metalic).

Elementele metalice componente, care nu fac parte din circuitul de lucru, ale instalațiilor și echipamentelor, cu tensiuni nominale de și peste 1 kV, trebuie să fie legate la pămînt dacă există posibilitatea de a veni în atingere cu părți sub tensiune înaltă ca urmare a unor defecte de izolație sau printr-un arc electric.

Exemple de legare la pămînt sînt date în fig. 8.40.

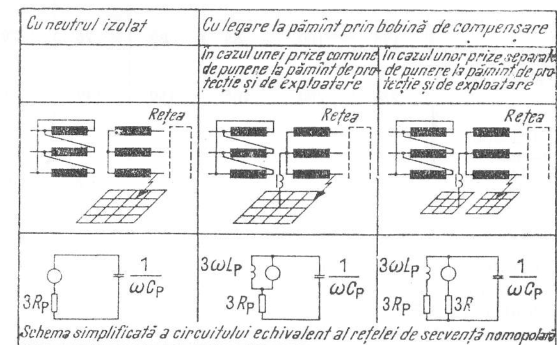


Fig. 8.40. Curentul prin rezistența de dispersie a prizei de pămînt a unei stații: R_p — rezistența de dispersie a prizei de pămînt a instalației de legare la pămînt a stației; R — rezistența de dispersie a prizei de pămînt a instalației de legare la pămînt de exploatare a stației; L_p — inductivitatea bobinei de compensare; C_p — capacitatea față de pămînt a rețelei.

Dispozitivele mobile de scurtcircuitare și legare la pămînt sînt destinate pentru legarea la pămînt a elementelor conductoare făcînd parte din circuitele de lucru (scoase de sub tensiune pentru lucrări) în vederea realizării protecției împotriva electrocutării lor prin atingere directă în timpul executării lucrărilor în instalația respectivă. Elementele componente ale acestor dispozitive (conductoare și cleme de legătură), trebuie

să poată rezista la curenţii de scurtcircuit care ar apărea în punctul lor de instalare. Se vor folosi numai conductoare de cupru. Densitatea de curent maxim admisibilă este $j = 264$ A/mm².

Rezistenţa admisibilă de dispersie a instalaţiilor de legare la pămînt în cazul aplicării în instalaţiile de înaltă tensiune a protecţiei prin legare la pămînt

Rezistenţa de dispersie maximă admisă rezultă din condiţiile din STAS 7334-70. În cazul în care instalaţia de legare la pămînt de pe partea de înaltă tensiune este separată de cea din reţeaua de joasă tensiune care alimentează consumatori din afara instalaţiei electrice de înaltă tensiune, rezistenţele de dispersie rezultă din condiţia ca tensiunile de atingere şi de pas să fie mai mici sau cel mult egale cu valorile din tabelul 8.6 a în funcţie de timpul curentului de punere la pămînt prin priză (timpul de bază al protecţiei respective) şi de categoria instalaţiei.

Tabelul 8.6 a

Categoria instalaţiei sau echipamentului	Timpul de întrerupere a curentului de punere la pămînt prin priză s							
	$\leqslant 0,2$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8...3	$\geqslant 3$
I Din zonă cu circulaţie frecventă	125	100	85	80	75	70	65	40
II Din zonă cu circulaţie redusă	250	200	165	150	140	130	125	125
III Din zonă cu circulaţie redusă şi se folosesc mijloace individuale de protecţie izolante	500	400	330	300	280	260	250	250

În cazul instalaţiilor electrice din afara incintelor industriale (staţii, posturi, centrale), pentru timpi mai mari de 3 s şi zone cu circulaţie frecventă, se admite de asemenea valoarea de 65 V.

Pentru posturile de transformare şi stîlpii liniilor electrice aeriene se prevăd condiţii speciale.

La determinarea rezistenţei de dispersie trebuie să se ia în consideraţie şi coeficienţii de atingere k_a şi de pas k_{pas} ai instalaţiei de legare la pămînt respective (STAS 7334-70 pct. 2.3.1).

În acest scop se prevăd electrozi special destinaţi dirijării cît mai favorabile a distribuţiei potenţialelor.

Relaţiile de determinare a rezistenţei de dispersie sînt:

$$R_p \leqslant \frac{U_a}{k_a I_p} \text{ şi } R_p \leqslant \frac{U_{pas}}{k_{pas} I_p}.$$

Se va mai efectua o verificare la stabilitatea termică astfel încît temperatura pe suprafaţa electrozilor prizei să nu depăşească valoarea de 95°C. Condiţiile de stabilitate termică sînt:

a) regim termic de lungă durată (nelimitat)

$$R_p \leqslant \frac{12 \sqrt{\rho}}{I_p};$$

b) regim termic limitat la un timp egal cu cel indicat în tabelul 8.6 *b* în funcţie de rezistivitatea solului, dacă timpul de deconectare considerat t' este diferit de cel din tabel t, însă nu mai mare decît acesta:

$$R_p \leqslant \frac{125}{I_p} \sqrt{\frac{t}{t'}};$$

Tabelul 8.6 b

Rezistenţa solului Ωm	Durata t maximă, în min	
	Priză verticală din ţevi	Priză orizontală din bandă sau bară rotundă
50	100	30
100	200	60
200	400	120
300	600	180

c) Regim termic de scurtă durată, t de ordinul secundelor; suprafaţa electrozilor prizei în m² trebuie să fie:

$$S = I_p \cdot \sqrt{\rho\, t} \cdot 10^{-4}$$

În relaţiile de mai sus ρ se exprimă în Ω · m, iar I_p în A.

Folosirea în comun a instalaţiilor de legare la pămînt

1. La instalaţiile electrice (centrale, staţii, posturi de transformare) unde partea de joasă tensiune este utilizată numai pentru alimentarea unor consumatori proprii din incinta acestora se va folosi totdeauna în comun instalaţia de legare la pămînt atît pentru partea de joasă tensiune cît şi pentru partea de înaltă tensiune.

Definiţie. Prin consum propriu al unei centrale, staţii de conexiune sau de transformare se înţelege necesarul de putere pentru asigurarea funcţionării echipamentului electric auxiliar, încălzire şi iluminatul instalaţiei; în această categorie mai sînt cuprinse încăperile administrative şi birourile, terenul instalaţiei şi locuinţele din cadrul unor asemenea instalaţii sau oricare alţi consumatori din zona prizei de pămînt, care sînt alimentaţi din reţeaua serviciilor proprii (auxiliare).

Se vor lega între ele elementele componente ale instalaţiilor de legare la pămînt de protecţie.

Instalaţiile de legare la pămînt de protecţie ale instalaţiilor de înaltă tensiune vor fi legate cu instalaţia de legare la pămînt de exploatare şi cu cele ale instalaţiilor de pe partea de joasă tensiune.

2. La instalaţiile electrice (centrale, staţii, posturi de transformare) a căror parte de joasă tensiune alimentează consumatorii din afara instalaţiei respective se va folosi în comun instalaţia de legare la pămînt în următoarele cazuri:

— reţeaua de înaltă tensiune este compusă în întregime din cabluri cu mantale exterioare conductoare;

— reţeaua de înaltă tensiune este compusă din linii aeriene şi cabluri avînd mantale exterioare conductoare — numai pentru instalaţiile din zona în cablu a reţelei — ; această zonă în cablu a reţelei trebuie să aibă o lungime totală de minimum 3 km.

Dacă reţeaua de înaltă tensiune este compusă din linii aeriene sau cablur fără înveliş metalic, de regulă instalaţia de legare la pămînt pentru partea de joasă tensiune se va separa faţă de instalaţia de legare la pămînt de pe partea de înaltă tensiune. Separarea va fi astfel realizată încît să nu rezulte în reţeaua de joasă tensiune, tensiuni de atingere şi de pas mai mari de 65 V; se va realiza distanţarea electrozilor prizelor de pămînt la cel puţin 20 m între ei, distanţarea necesară între conductoarele de legare la pămînt sau intercalarea de materiale izolante.

În cazul în care separarea practic nu se va putea realiza sau ar necesita cheltuieli mari, se va putea folosi în comun instalaţia de legare la pămînt numai dacă se respectă condiţia ca rezistenţa instalaţiei de legare la pămînt să fie

$$R_p \leqslant \frac{65}{I_p}.$$

La posturile de transformare la care se foloseşte în comun instalaţiile de legare la pămînt, indiferent de rezultatele calculelor, rezistenţa de dispersie trebuie să fie mai mică sau cel mult egală cu 4 Ω.

Stîlpii liinilor aeriene

La stîlpii fără aparataj ai oricăror linii electrice aeriene din zona cu circulaţie redusă (definite în STAS 8275-68 pct. 1. 14) tensiunile de atingere şi de pas nu se normează şi deci instalaţiile de legare la pămînt de la aceşti stîlpi se dimensionează numai din condiţii de protecţie împotriva supratensiunilor atmosferice.

În reţelele cu neutrul izolat sau legat la pămînt prin bobină de compensare, pentru stîlpii cu aparataj (transformator de putere sau de măsură, separator, descărcător, bobină condensator, întreruptor etc.) se aplică condiţiile generale de respectare a tensiunilor de atingere şi de pas aplicate instalaţiilor electrice. Se impune ca personalul de exploatare să folosească mijloace individuale de protecţie cînd se apropie de aceşti stîlpi. La stîlpi fără aparataj din aceste reţele, aflaţi în zona cu circulaţie frecventă (definite în STAS 8275-68 pct. 1.15), instalaţiile de legare la pămînt vor fi astfel dimensionate încît tensiunile de atingere şi de pas să fie mai mici sau cel mult egale cu 125 V indiferent de timpul de întrerupere a curentului de punere la pămînt considerat în calcule:

$$R_p \leqslant \frac{125}{k_a I_p} \text{ şi } R_p \leqslant \frac{125}{k_{pas} I_p}.$$

Se recomandă folosirea izolatoarelor nestrăpungibile.

În reţelele legate la pămînt (definite în STAS 8275-68 pct. 1.12), la stîlpii cu aparataj indiferent de zonă şi la stîlpii fără aparataj din zone cu circulaţie frecventă, instalaţiile vor fi astfel dimensionate încît tensiunile de atingere şi de pas să fie mai mici sau cel mult egale cu 250 V indiferent de timpul de deconectare a curentului de punere la pămînt. Fac excepţie stîlpii din incintele îngrădite ale unităţilor industriale sau agricole unde valoarea limită a tensiunilor de atingere şi de pas este 125 V indiferent de timpul de deconectare. Pentru ambele cazuri se recomandă folosirea de izolatoare nestrăpungibile la stîlpii respectivi.

În cazul în care nu se pot realiza cu mijloace economice tensiunile de mai sus, folosirea izolatoarelor nestrăpungibile este obligatorie la stîlpii respectivi, iar prizele de pămînt se realizează cu cel puţin trei electrozi inelari şi patru radiali pentru dirijarea distribuţiei potenţialelor.

Curenţii prin prizele de pămînt în cazul punerilor la pămînt în instalaţiile electrice cu tensiuni nominale de şi peste 1 kV

Reţelele cu neutrul izolat sau legat la pămînt prin bobine de compensare. Aceste reţele vor fi prevăzute cel puţin cu protecţii pentru semnalizarea punerilor simple la pămînt şi protecţii pentru deconectarea automată în cazul punerilor duble la pămînt.

Pentru calcule privind respectarea tensiunilor de atingere şi de pas se consideră curentul de punere simplă la pămînt sau, în cazul compensării, curentul rezidual (rezultat după compensare) însă nu mai puţin de 10 A. Timpul acestui curent se consideră de lungă durată (mai mare de 3 s).

Pentru calcule de verificare la stabilitate termică se disting două cazuri:

a) reţeaua este constituită din cabluri cu înveliş metalic continuu în întregime sau avînd o lungime predominantă (peste 66% din totalul reţelei), dar nu mai mică de 10 km; se consideră curentul de punere simplă la pămînt sau cel rezidual dar nu mai puţin de 10 A, timp de lungă durată (nelimitat);

b) reţeaua este constituită din linii aeriene sau cabluri care nu îndeplinesc condiţiile de mai sus; se consideră condiţia cea mai grea din următoarele situaţii:

— curentul maxim de punere dublă la pămînt printr-o rezistenţă de trecere la pămînt de calcul de 4Ω, la timpul protecţiei maximale de curent respectiv [1]);

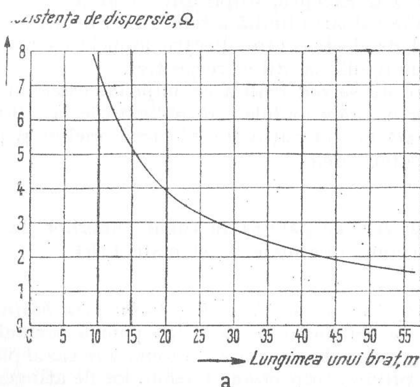
— curentul de punere simplă la pămînt sau cel rezidual, dar nu mai puţin de 10 A, timp de lungă durată;

— curentul minim prin priză la care acţionează protecţia prevăzută pentru deconectarea automată, cu timpul considerat pentru înlăturarea punerilor simple la pămînt; dacă această verificare nu dă rezultate satisfăcătoare, nu se reduce rezistenţa de dispersie, ci se verifică în exploatare instalaţiile respective de legare la pămînt cînd are loc o punere dublă nedeconectată.

Pentru determinarea curentului de calcul în cazul acestui mod de tratare a neutrului, generatorul fictiv din sistemul de secvenţă homopolară are drept tensiune la borne aproximativ tensiunea neutrului. Curentul rezultant determină apariţia potenţialului prizei de pămînt la bornele unei rezistenţe a cărei valoare este de trei ori mai mare decît rezistenţa prizei de pămînt.

[1]) Această condiţie nu se aplică în cazul stîlpilor liniilor aeriene.

În cazul staţiilor din reţele de cabluri, se introduce rezistenţa de legare la pămînt a mantalelor metalice ale cablurilor care sînt legate la pămînt cînd instalaţia este în funcţiune. Folosind procedeul descris în cazul generatorului fictiv, se calculează potenţialul prizei de pămînt cu un coeficient de siguranţă.



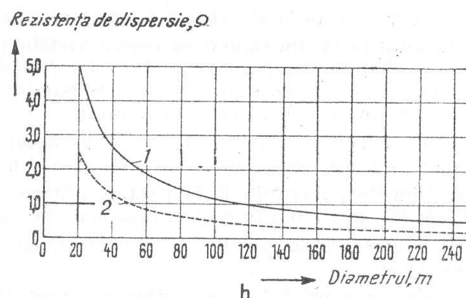


Fig. 8.41. Rezistenţa de dispersie a unei prize: *a* — cu electrozi dispuşi radial în stea cu patru braţe, în funcţie de lungimea braţelor (condiţii: rezistivitatea solului 100 Ωm; diametrul echivalent al benzii 2 cm); *b* — cu electrozi din bară de cupru (secţiunea 50 mm²) dispusă în formă de inel circular şi cu placă circulară în funcţie de diametru (diametru 20–250 m; condiţii: rezistivitatea solului 100 Ωm); *1* — inel circular; *2* — placă circulară.

Reţele legate la pămînt. Aceste reţele vor fi prevăzute cu protecţii care să deconecteze rapid (în cel mult 3 s) circuitul în cazul unei puneri la pămînt monofazate în reţeaua respectivă.

Atît pentru calculele privind respectarea tensiunilor de atingere şi de pas cît şi pentru cele de verificare la stabilitate termică a prizei de pămînt, se consideră curentul de punere la pămînt maxim prin priză la un scurtcircuit monofazat în reţea, cu menţiunea că în primul caz se consideră timpul protecţiei de bază, iar în cel de al doilea caz timpul protecţiei de rezervă.

Suma vectorială a curenţilor de întoarcere prin pămînt ai tuturor liniilor care pleacă din instalaţie, trece prin rezistenţa prizei de pămînt.

Această regulă se aplică pentru defecte atît în interiorul, cît şi în afara instalaţiei. Curentul de întoarcere prin pămînt este în acest caz produsul dintre curentul total de secvenţă homopolară $3\ I_0$ şi coeficientul de reducere al liniei. Curentul de secvenţă homopolară se determină din calcul sau prin măsurări pe un model de reţea. Produsul dintre factorul de reducere şi rezistenţa instalaţiei de legare la pămînt se poate de asemenea măsura.

Tensiunile care apar în cazul unui scurtcircuit la pămînt, dacă nu sînt provocate prin inducţie, sînt aproximativ proporţionale cu curentul care circulă prin rezistenţa instalaţiei de legare la pămînt. Obţinerea tensiunilor de atingere şi de pas admisibile se poate realiza în cele mai numeroase cazuri prin combinaţii corespunzătoare de electrozi ai prizei de pămînt în vederea dirijării avantajoase a distribuţiei potenţialelor în interiorul incintei instalaţiei electrice.

Potenţialele prizelor de pămînt ai stîlpilor liniei aeriene, care apar în cazul cel mai defavorabil al unui defect în porţiunea centrală a unei linii ce leagă între ele două transformatoare, se poate obţine, pentru unele dispoziţii normale ale conductorului de protecţie, din fig. 8.42 ... 8.47 ca o funcţie de curentul total de defect, de rezistenţele instalaţiilor de legare la pămînt ale stîlpilor[1]), de secţiunea conductorului de protecţie şi de lungimea medie a deschiderii.

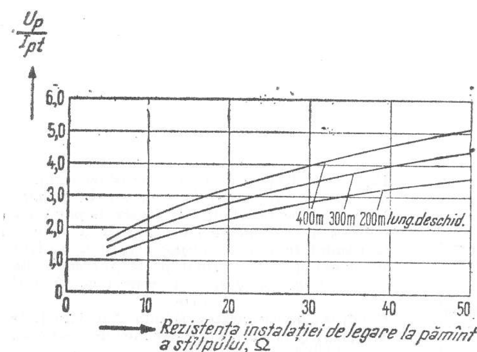


Fig. 8.42. Raportul dintre tensiunea prizei de pămînt şi curentul de punere la pămînt în funcţie de rezistenţa instalaţiei de legare la pămînt a stîlpului respectiv şi de lungimea deschiderii, la puneri la pămînt în zona de mijloc a unei linii aeriene lungi, avînd conductorul de protecţie din cablu de oţel cu secţiunea de 50 mm²:
U_p — potenţialul prizei de pămînt;
I_{pt} — curentul total de punere la pămînt.
Condiţie: rezistivitatea solului 200 Ωm (alte valori introduc variaţii relativ mici în acest caz).

[1]) Fără conductorul de protecţie

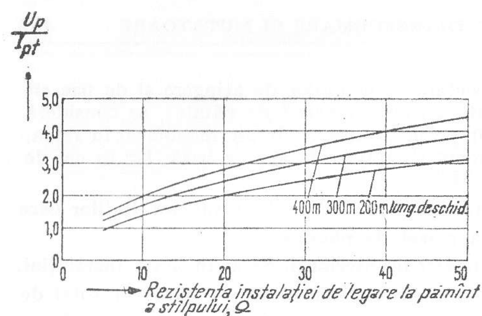


Fig. 8.43. Raportul dintre tensiunea prizei de pămînt și curentul de defect la pămînt în funcție de rezistența de legare la pămînt a stîlpilor și de lungimea deschiderii la defecte la pămînt în zona de mijloc a unei linii aeriene lungi, avînd conductorul de protecție din cablu de oțel cu secțiunea 70 mm². Condiție: rezistivitatea solului 200 Ωm (alte valori introduc variații relativ mici în acest caz).

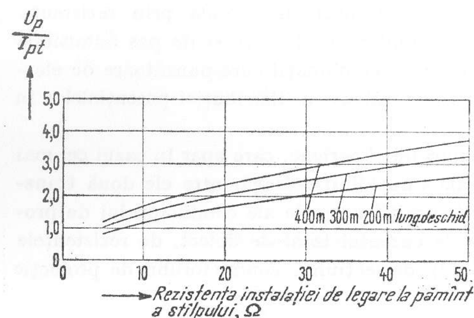


Fig. 8.44. Raportul dintre tensiunea prizei de pămînt și curentul de defect la pămînt în funcție de rezistența de legare la pămînt a stîlpilor și de lungimea deschiderii la defecte la pămînt în zona de mijloc a unei linii aeriene lungi, avînd conductorul de protecție din cablu de oțel cu secțiunea de 95 mm².
Condiție: rezistivitatea solului 200 Ωm (alte valori introduc variații relativ mici în acest caz).

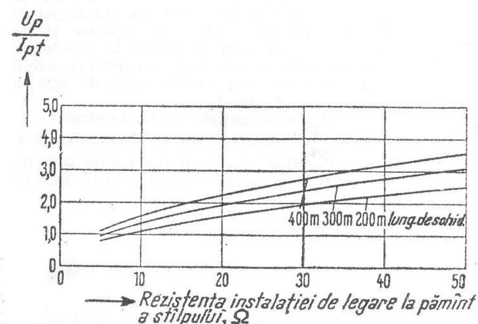


Fig. 8.45. Raportul dintre tensiunea prizei de pămînt și curentul de defect la pămînt în funcție de rezistența de legare la pămînt a stîlpilor și de lungimea deschiderii la defecte la pămînt în zona de mijloc a uni linii aeriene lungi, avînd conductorul de protecție compus din două cabluri de oțel cu secțiunea de 50 mm² fiecare.
Condiție: rezistiviratea solului 200 Ωm (alte valori introduc variații relativ mici în acest caz).

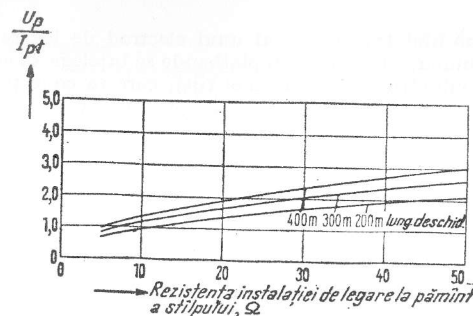


Fig. 8.46. Raportul dintre tensiunea prizei de pămînt și curentul de defect la pămînt în funcție de rezistența de legare la pămînt a stîlpilor și de lungimea deschiderii la defecte la pămînt în zona de mijloc a unei linii aeriene lungi, avînd conductorul de protecție compus din două cabluri de otel cu sectiunea de70 mm² fiecare.
Condiție: rezistivitatea solului 200 Ωm alte valori introduc variații relativ mici în acest caz.

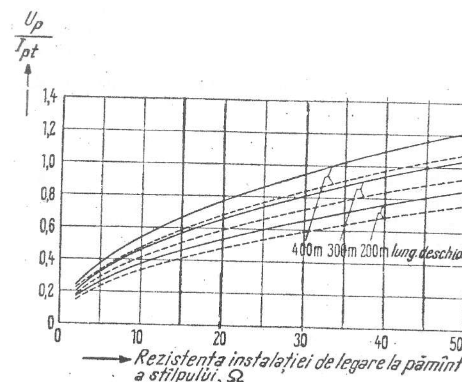


Fig. 8.47. Raportul dintre tensiunea prizei de pămînt și curentul de defect la pămînt în funcție de rezistența de legare la pămînt a stîlpilor și lungimea deschiderii la defecte la pămînt în zona de mijloc a unei linii aeriene lungi.
Condiție: rezistivitatea solului 200 Ωm (alte valori introduc variații relativ mici în acest caz).
——— Conductor de protecție Ol-Al 240/40
— -- — Două conductoare de protecție Ol-Al 4 4/33 așezate la distanță de 15 m între ele.

Rezistența prizelor simple de pămînt

Rezistențele de dispersie a prizelor simple de pămînt sînt date în fig. 8.48—8.53.

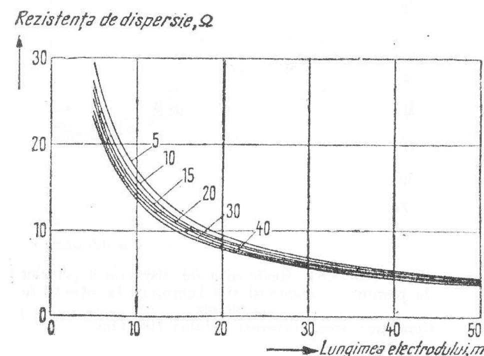


Fig. 8.48. Rezistența de dispersie a prizelor de pămînt cu electrozi din bandă sau conductor cu lungimea pînă la 50 m pozați în pămînt la adîncimea de 0,5 m, pentru diferite diametre și diametre echivalente ale benzii sau ale electrodului dreptunghiular, în mm.
Condiții: rezistivitatea solului 100 Ωm dispoziție extinsă.

Prin diametrul echivalent pentru profilul transversal al unui electrod de legare la pămînt (de exemplu un profil dreptunghiular), în cazul unei platbande se înţelege diametrul unui electrod de legare la pămînt cilindric (de ex. al unei tije), care în condiţii în rest egale prezintă rezistenţă egală.

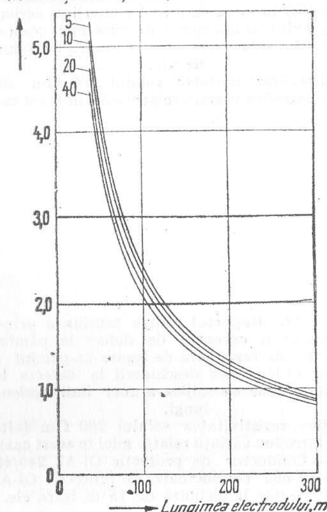


Fig. 8.49. Rezistenţa de dispersie a prizelor de pămînt cu electrozi din bandă sau conductor cu lungimea de 40–300m pozaţi în pămînt la adîncime de 0,5 m, pentru diferite diametre şi diametre echivalente ale benzii sau ale electrodului dreptunghiular în mm.
Condiţii: rezistivitatea solului 100Ωm; dispoziţie extinsă.

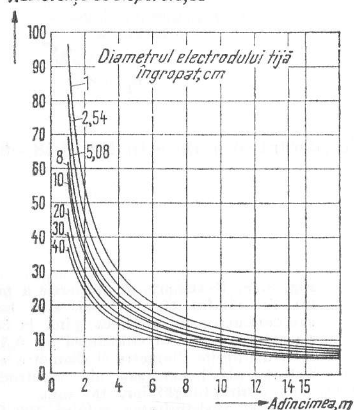


Fig. 8.50. Rezistenţa de dispersie a prizelor de pămînt cu electrozi tijă îngropaţi la 1 – 15 m adîncime, pentru diferite diametre ale electrodului tijă îngropat, în cm. Condiţie: rezistivitatea solului 100 Ωm.

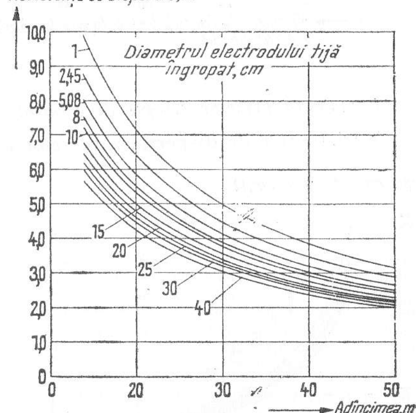


Fig. 8.51. Rezistenţa de dispersie a prizelor de pămînt cu electrozi tijă îngropaţi la 14–50 m adîncime.
Condiţie: Rezistivitatea solului 100 Ωm.

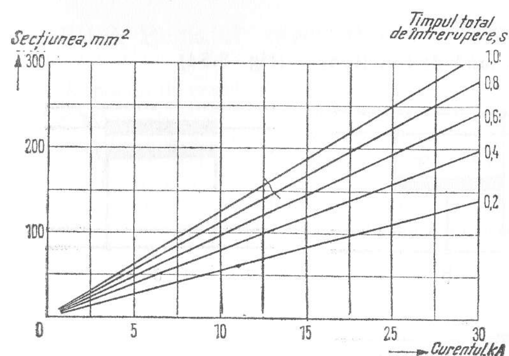


Fig. 8.52. Secţiunea necesară a conductoarelor de legare la pămînt din oţel galvanizat (la cald) în funcţie de mărimea curentului de dublă punere la pămînt sau de scurtcircuit monofazat şi de timpul total de întrerupere. Ordinul de mărime al curentului: 5–25 kA.
Condiţii: Temperatura finală 300°C. Temperatura în momentul iniţial a scurtcircuitului 20°C.

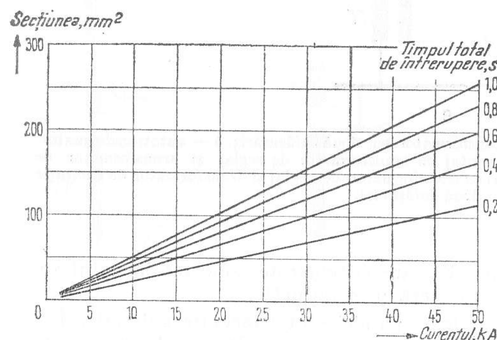


Fig. 8.53. Secţiunea necesară a conductoarelor de legare la pămînt din cupru în funcţie de mărimea curentului de dublă punere la pămînt sau de scurtcircuit monofazat şi de timpul total de întrerupere. Ordinul de mărime al curentului: 5–50 kA.
Condiţii: Temperatura finală 300°C. Temperatura în momentul iniţial al scurtcircuitului 20°C.

Tabelul 8.6. c. Valori orientative pentru capacitatea de încărcare a conductoarelor de legare la pămînt

Secţiune mm²	Curent permanent, în A, pentru conductoare din			Curent admisibil timp de 1 s, în A, pentru conductoare din		
	Oţel	Aluminiu 2)	Cupru	Oţel	Aluminiu 2)	Cupru
16	—	—	150	—	—	2 500
25	—	160	200	—	2 700	4 000
35	—	200	280	—	3 700	5 500
50	150 1)	250 1)	480 1)	3 300	5 300	8 000
70	180 1)	320 1)	590 1)	4 700	7 400	11 500
100	240 1)	430 1)	780 1)	6 700	10 500	16 000
200	420 1)	760 1)	1 380 1)	13 500	21 500	32 500

1) Numai în cazul platbandelor.
2) Admisibil numai dacă, în cazul respectiv de utilizare, aluminiul este mai rezistent la coroziune decît oţelul şi cuprul.
Notă. Datele de mai sus se referă la temperatura maximă de 200°C. Se admite o creştere a temperaturii maxime pînă la 300°C cu condiţia să nu apară riscul de incendiu; în acest caz valorile se înmulţesc cu **1,2.**

8.4. TRANSFORMATOARE [1])

8.4.1. Tipuri de transformatoare, mod de funcţionare (fig. 8.54)

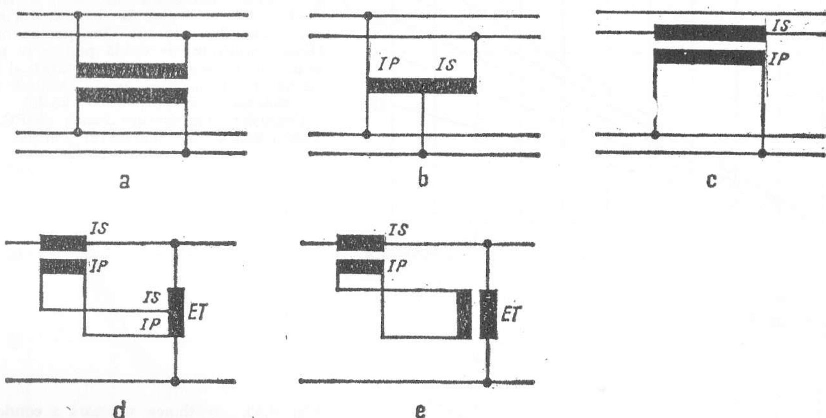


Fig. 8.54. Tipuri de transformatoare: *a* — transformator cu două înfăşurări; *b* — autotransformator; *c* — transformator de reglaj (booster); *d* — montaj cu transformator de reglaj şi transformator de excitaţie *ET* ca autotransformator; *e* — montaj cu transformator de reglaj şi transformator de excitaţie *ET* cu două înfăşurări.

Transformatoare cu două înfăşurări. Fiecare sistem este conectat la o înfăşurare separată, în paralel cu ea. Puterea se transferă prin inducţie.

Autotransformatoare. Înfăşurările serie şi paralel sînt conectate galvanic. Înfăşurarea paralel este în paralel cu un sistem, iar înfăşurarea serie leagă cele două sisteme. Puterea transmisă P_T este transferată parţial prin conducţie galvanică şi parţial prin inducţie. Puterea interioară P_I a unui autotransformator este puterea transferată prin inducţie.

$$P_I = P_T \frac{U_1 - U_2}{U_1}$$

unde: U_1 este tensiunea înaltă, iar U_2 este tensiunea joasă.

Transformatoare de reglaj (booster). Înfăşurările serie şi paralel sînt separate între ele. Înfăşurarea paralel este în paralel cu un sistem, iar înfăşurarea serie este în serie cu celălalt sistem. Puterea în aceste transformatoare se transmite prin inducţie. Montajele cu transformator de reglaj (booster) se compun dintr-un transformator de excitaţie, care poate fi cu două înfăşurări sau un autotransformator şi un transformator de reglaje booster) a cărui înfăşurare în paralel este legată la transformatorul de excitaţie.

[1]) Toate caracteristicile transformatoarelor sînt reglementa prin STAS 1703-67; pentru nivelele de izolaţie STAS 6489-67.

8.4.2. Reglajul raportului de transformare

Raportul de transformare se poate regla în trepte, atît la mersul în gol, cu ajutorul regulatoarelor de mers în gol (domenii de reglaj ale prizelor, de exemplu $\pm$ 2,5%, $\pm$ 4% sau 5%) cît şi în sarcină, cu ajutorul regulatoarelor sub sarcină (domenii de reglaj ale prizelor, de exemplu $\pm$ 11%, $\pm$ 16% sau $\pm$ 22%). În cazul transformatoarelor cu două înfăşurări regulatorul prizelor se leagă de preferinţă la neutrul înfăşurării de înaltă tensiune. La autotrnasformatoare există diverse moduri posibile de legare a regulatorului de prize, de exemplu pe neutru, la extremitatea înfăşurărilor serie, între înfăşurările serie şi paralel sau în montaj ramificat (fig. 8.55).

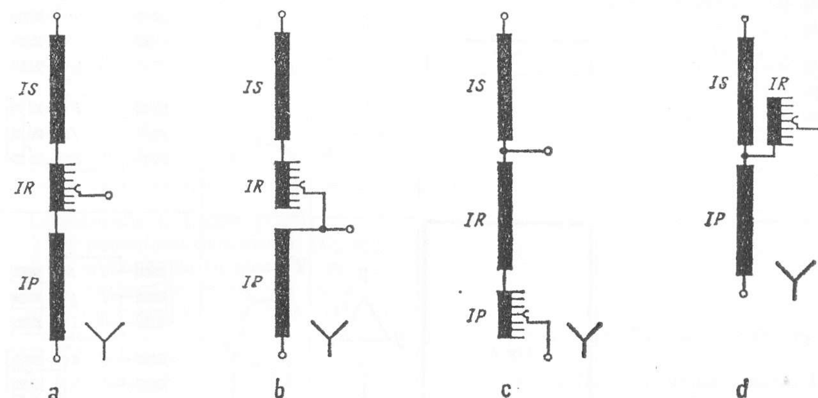


Fig. 8.55. Moduri de reglaj al raportului de transformare al autotransformatoarelor: *a* — dispoziţia înfăşurării de reglaj între înfăşurarea serie şi cea în paralel; *b* — dispoziţia înfăşurării de reglaj la extremitatea înfăşurării serie; *c* — dispoziţia înfăşurării de reglaj pe neutrul stelei; *d* — dispoziţia înfăşurării de reglaj în montaj ramificat la borna de joasă tensunie; *IS* — înfăşurare serie; *IP* — înfăşurare paralel; *IR* — înfăşurare de reglaj.

În cazuri speciale se combină transformatoare cu două înfăşurări, autotransformatoare sau transformatoare de reglaj în scopul reglării raportului de transformare sub sarcină, de exemplu în montaje cu transformatoare de reglaj.

În cazul regulatoarelor de inducţie, regulatoarelor cu bobină mobilă etc. este posibil un reglaj continuu al raportului de transformare.

8.4.3. Grupe de conexiuni[1])

Grupa de conexiuni indică modul de conectare a fazelor a două înfăşurări ale unui transformator şi, prin indicele numeric (numărul orar), defazajul dintre fazorii celor două tensiuni stelate (tabelul 8.7).

[1]) În România sînt reglementate prin STAS 1703-67. Nu se consideră cazul înfăşurărilor deschise.

Tabelul 8.7. Grupe de conexiuni şi diagrame uzuale pentru transformatoare trifazate

Denumirea		Diagrama vectorială		Schema de conexiuni [1])	
Indice numeric	Grupa de conexiuni	IT	JT	IT	JT
12	Dd_{12}				
	Yy 12				
	Dz 12				
5	Dy 5				
	Yd 5				
	Yz 5				
6	Dd 6				
	Yy 6				
	Dz 6				

Tabelul 8.7 (continuare)

Denumirea		Diagrama vectorială		Schema de conexiuni [1])	
Indice numeric	Grupa de conexiuni	IT	JT	IT	JT
11	DY 11				
	Yd 11				
	Yz 11				

[1]) Înfăşurările sînt presupuse a fi executate în acelaşi sens, adică, în schemele de conexiuni înfăşurările trebuie să fie considerate ca fiind (fizic) îndreptate în jos.

Conexiunile trifazate pot fi:

1 — conexiune în triunghi (D, d);
2 — conexiunea în stea (Y, y);
3 — conexiune în zig-zag (Z, z);
4 — cu înfăşurări deschise (III, iii).

Literele mari se aplică la înfăşurarea de înaltă tensiune ÎT, iar literele mici la înfăşurarea de joasă tensiune JT.

Indicele numeric arată cu ce multiplu de 30° este defazat în urmă fazorul joasei tensiuni (rotaţie antiorară a fazorilor) faţă de fazorul de înaltă tensiune al bornei de acelaşi nume. Bornele u, v, w sau x, y, z, de pe partea de joasă tensiune corespund bornelor U, V, W pe partea de înaltă tensiune.

Fig. 8.56 arată cum se determină indicii numerici pentru grupele de conexiuni Dy5 şi Yz11.

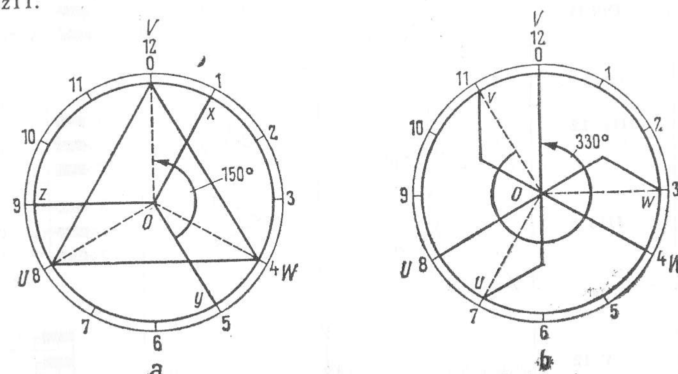


Fig. 8.56. Determinarea indicelui numeric (numărul orar): *a* — grupa de conexiuni Dy 5; *b* — grupa de conexiuni Yz11.

Grupa de conexiuni Dy5

Înaltă tensiune conectată în triunghi (D); joasa tensiune conectată în stea (y); unghiul de fază între tensiunile y—0 şi V—0 este de 150°; indicele numeric: $\frac{150°}{30°} = 5$.

Grupa de conexiuni Yz11

Înalta tensiune conectată în stea (Y); joasa tensiune conectată în zig-zag (z); unghiul de fază între tensiunile y—0 şi V—0 este de 330°; indicele numeric: $\frac{330°}{30°} = 11$.

Grupele obişnuite de conexiuni sînt indicate în tabele 8.7 şi 8.8.

Tabelul 8.8. Exemple de grupe şi scheme de conexiuni pentru transformatoare cu înfăşurări deschise, autotransformatoare şi transformatoare monofazate

Denumirea		Diagrama vectorială		Schema de conexiuni [1])	
Indice numeric [2])	Grupa de conexiuni [2])	IT	JT	IT	JT
Unităţi de transformare trifazate					
12	Yiii 12				
11	Diii 11				
12	IIIy 12				
5	IIId 5				
12	Y 12				

Tabelul 8.8 (continuare)

Denumirea		Diagrama vectorială		Schema de conexiuni [1])	
Indice numeric [2])	Grupa de conexiuni [2])	IT	JT	IT	IT
Unităţi de transformare monofazate pentru conectare trifazată [3])					
12	Ii 12				
12	I 12				

[1]) V. nota 1 de la tabelul 8.7.

[2]) Indicii numerici din acest tabel se aplică în cazul legării în stea a înfăşurărilor deschise(punctul neutru în *X*, *Y*, *Z* şi respectiv *x*, *y*, *z*.

[3]) În cazul transformatoarelor pentru sisteme monofazate, denumirile bornelor *X*, *x* se înlocuiesc cu *V*, *v*.

8.4.4. Metode de răcire, temperaturile agenţilor de răcire, creşteri de temperatură

Răcirea naturală (L): răcire prin circulaţie naturală de aer şi radiaţie.

Răcire forţată (S): răcire prin aer pus în mişcare de ventilatoare.

Răcire cu circulaţie forţată de ulei cu ajutorul unor pompe (F)[1]):

Răcire naturală şi circulaţie de ulei FL; răcirea uleiului circulat prin circulaţie naturală de aer şi radiaţie.

Răcire prin circulaţie forţată de aer şi circulaţie de ulei FS: uleiul este pompat prin răcitoare de ulei cu aer în afara cuvei transformatorului şi răcite prin circulaţie de aer pus în mişcare de ventilatoare.

Răcire cu apă şi circulaţie de ulei FA: uleiul este pompat prin răcitoare de ulei cu apă în afara cuvei transformatorului şi răcite cu apă.

Creşterile de temperatură indicate în tabelul 8.9 [2]) se aplică pentru temperaturile următorilor agenţi de răcire:

[1]) În locul literei F, normele germane prevăd litera U, iar cele engleze C.

[2]) Aceste valori concordă cu supratemperaturile admisibile prevăzute în STAS 1703-67.

Tabelul 8.9. Creșteri admisibile de temperatură, în grade

	Clasa materialului izolant					
	A	A_0	E	B	F	H
Înfășurări	60	65	75	80	100	135
Uleiul în stratul superior	—	(60 [1]) (55)	—	—	—	—
Miezuri de fier și alte elemente	Temperetura nu trebuie să deterioreze materialele situate în imediata apropiere.					

[1]) În cazul cînd uleiul din cuvă este separat de aer, de exemplu prin folosirea unui conservator; în cazul contrar trebuie considerată valoarea de 55° (v. și tabelele 2.19 și 2.20).

— Transformatoare cu răcire cu aer (moduri de răcire L, S, FL, FS):
temperatura maximă a aerului 40°C;
temperatura medie zilnică a aerului 30°C;
temperatura medie anuală a aerului 20°C.
— Transformatoare cu răcire cu apă (modul de răcire FA); temperatura apei la admisie 25°C.

8.4.5. Caracteristicile transformatoarelor

Tensiunea de scurtcircuit, reglajul tensiunii

La transformatoare trifazate, pentru sistemele de secvență directă și inversă este importantă tensiunea de scurtcircuit (impedanța de mers în gol se poate neglija în general). Tensiunea de scurtcircuit este tensiunea de frecvență nominală care trebuie să fie aplicată pe partea de alimentare pentru a se obține pe partea de consum, legată în scurtcircuit, curentul nominal. Ea se exprimă de obicei ca un procent din tensiunea nominală de mers în gol pe partea alimentării.

Banda de reglaj (reglajul) de tensiune a unui transformator este diferența dintre tensiunea nominală și tensiunea la plină sarcină pe partea de consum, în condiții nominale de funcționare la un anumit factor de putere cos φ. Se exprimă după cum urmează ecuația numerică pentru calculul reglajului de tensiune ca procent din tensiunea nominală)

$$u_\varphi = u'_\varphi + 100 - \sqrt{100^2 - u''^2_\varphi} \approx u_\varphi + \frac{u''^2_\varphi}{200};$$

$$u'_\varphi = u_X \sin\varphi + u_R \cos\varphi;\ u''_\varphi = u_X \cos\varphi - u_R \sin\varphi,$$

unde: u_R reprezintă pierderea de putere P_L raportată la puterea nominală P_N, adică

$$u_R = \frac{P_L}{P_N} 100\,\%;$$

u_X — componenta reactivă a tensiunii de scurtcircuit u_c (în procente)

$$u_X = \sqrt{u_c^2 - u_R^2}.$$

Valoarea curentului de scurtcircuit (valoarea efectivă simetrică) a unui transformator, I_{ss}, este

$$I_{ss} = \frac{I_N}{u_c} 100\%,$$

unde I_N este curentul nominal.

Transformatoarele care leagă mai mult decît două sisteme se reprezintă cu ajutorul circuitelor echivalente. Dintre acestea, cel mai important este circuitul echivalent în stea al transformatorului cu trei înfășurări (fig. 8.57).

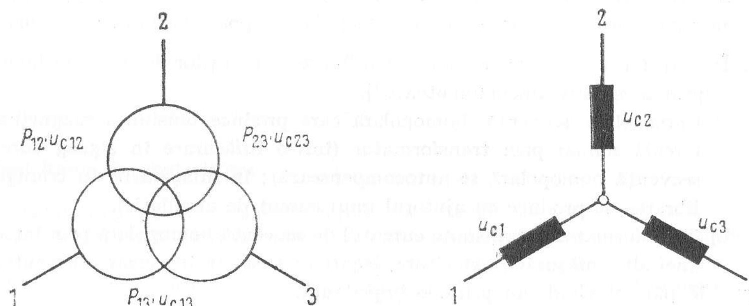


Fig. 8.57. Circuitul echivalent în stea al unui transformator cu trei înfășurări.

Tensiunile de scurtcircuit raportate ale celor trei ramuri ale circuitului echivalent sînt în acest caz:

$$u_{c1} = \frac{u_{c12} + u_{c13} - u_{c23}}{2},$$

$$u_{c2} = \frac{u_{c12} + u_{c23} - u_{c13}}{2},$$

$$u_{c3} = \frac{u_{c13} + u_{c23} - u_{c12}}{2}.$$

Toate valorile se vor raporta la aceeași putere.

Impedanța de secvență homopolară

Impedanțele de secvență homopolară au valori foarte diferite, în funcție de tipul de conexiuni și de construcția transformatoarelor (se neglijează curenții capacitivi și rezonanța între capacitățile și impedanțele de secvență homopolară).

Conductoarele legate la înfășurări de transformator cu conexiunea în triunghi sau cu conexiunea în stea sau în zigzag cu neutrul izolat nu sînt parcurse de curent homopolar. Rezultă că impedanța de secvență homopolară a acestora este infinită.

În cazul cînd neutrul unei înfășurări în stea sau în zigzag este legat la pămînt, în sistemul racordat pot circula curenți de secvență homopolară.

1. În cazul cînd transformatorul nu poate produce tensiune magnetomotoare pentru echilibrarea curenților de secvență homopolară (de exemplu curenții de secvență homopolară circulă printr-o înfășurare stea, iar toate celelalte înfășurări sînt legate în stea sau în zigzag și cu neutrul izolat), impedanța sa de secvență homopolară — în cazul transformatoarelor compuse din transformatoare monofazate și în cazul transformatoarelor trifazate cu miezul în manta sau cu cinci coloane — este de același ordin de mărime cu impedanța de mers în gol; în cazul transformatoarelor cu miezul din trei coloane impedanța depinde de mărimea curentului de secvență homopolară și poate varia în mod considerabil.
2. În transformator poate exista o echilibrare a curenților de secvență homopolară prin tensiunea magnetomotoare [1]).
   a) Curentul de secvență homopolară care produce tensiunea magnetomotoare circulă numai prin transformator (într-o înfășurare în zigzag curenții de secvență homopolară se autocompensează); în înfășurările în triunghi echilibrarea se produce cu ajutorul unui curent de circulație).
   b) Transformatorul transmite curentul de secvență homopolară prin intermediul unei alte înfășurări, exterioare, legate în stea sau în zigzag, cu neutrul legat la pămînt rigid sau printr-o impedanță.

Impedanța de secvență homopolară a unei înfășurări în zigzag în cazul a) corespunde aproximativ impedanței de scurtcircuit dintre cele două porțiuni ale înfășurării de pe o coloană, care, în mod obișnuit, este foarte mică. În toate celelalte cazuri b) impedanța de secvență homopolară a transformatorului este aproximativ egală cu impedanța corespunzătoare de scurtcircuit. Diferențele (depinzînd de curent) sînt produse de curentul de mers în gol, în sistemul de secvență homopolară și de cuvă, care introduce o tensiune magnetomotoare de echilibrare de anumită valoare.

În tabelul 8.10 sînt indicate valorile medii măsurate pentru transformatoare construite trifazat, cu miez de fier cu trei coloane, cu înfășurări cilindrice dispuse în ordinea tensiunilor crescătoare dinspre miez spre exterior (R_0, X_{00} reprezintă rezistența, respectiv reactanța sistemului de secvență homopolară la mers în gol, iar R și X_s reprezintă rezistența, respectiv reactanța transformatorului).

Valorile se aplică pentru prizele nominale ale transformatoarelor echipate cu regulatoare de tensiune sub sarcină pe partea de înaltă tensiune. În sensul prizelor cu plus $\frac{X_{00}}{X_s}$ scade în oarecare măsură, iar pe de altă parte $\frac{R_0}{R}$ crește; în sensul prizelor cu minus $\frac{X_{00}}{X_s}$ crește în oarecare măsură, în timp ce $\frac{R_0}{R}$ scade.

[1]) Sînt posibile combinații ale cazurilor a) și b).

Tabelul 8.10. Rapoarte de reactanță și rezistență pentru transformatoare (valori reprezentative)

Tipul transformatorului	Conexiuni și tensiuni nominale kV	Tensiunea nominală a înfășurării la care se referă valorile[1]) kV	$\frac{X_{00}}{X_s}$	$\frac{R_0}{R}$
Transformator de stație	⅄ 220/⅄ 110/Δ 10	220 110	0,65 0,81	2,5 1,6
	⅄ 110/⅄ 30/Δ 10	110 30	0,81 0,94	2,3 1,3
Transformator de generator	⅄ 220/Δ 10	220	0,84	2,0
	⅄ 110/Δ 6	110	0,87	2,0

[1]) Cealaltă înfășurare legată în stea rămîne deschisă. (Valori comparative pentru transformatoare de stații ⅄ 110/⅄ 20 kV: în cazul cînd curentul de secvență homopolară al înfășurării de 110 kV este 10% din curentul nominal, $X_{00}/Xs \approx 5{,}0$, iar $R_0/R \approx 50$).

Solicitarea la scurtcircuit

Tabelul 8.11 [1]) indică valorile maxime admisibile ale valorii efective simetrice a curentului de scurtcircuit (raportat la curentul nominal) și ale duratei scurtcircuitului

Tabelul 8.11. Curenții admisibili de scurtcircuit și durata admisibilă pentru transformatoare trifazate de putere cu două înfășurări

Puterea nominală kVA	$U_b \leqslant 36$ kV			$U_b > 36$ kV		
	$\frac{I_{ss\ adm}}{I_N}$	t_{adm} s	u_{cN} %	$\frac{I_{ss\ adm}}{I_N}$	t_{adm} s	u_{cN} %
Pînă la 630	25,0	2	4,0	—	—	—
Peste 630 pînă la 3150	16,7	4	6,0	—	—	—
Peste 3150 pînă la 10 000	12,5	5	8,0	10,0	6	10,0
Peste 10 000 pînă la 40 000	10,0	6	10,0	9,1	7	11,0
Peste 40 000 pînă la 200 000	—	—	—	8,0	8	12,5

Semnificația simbolurilor:
U_b este tensiunea maximă a sistemului (valoare efectivă) pe partea de înaltă tensiune;
$I_{ss\ adm}$ — valoarea maximă admisibilă a curentului de scurtcircuit simetric (valoare efectivă);
I_N — curent nominal;
t_{adm} — durata maximă admisibilă a scurtcircuitului;
u_{cN} — tensiunea de scurtcircuit procentuală corespunzătoare.

[1]) În România prevederile STAS 1703-66 nu diferă esențial de cele prezentate în tabelul 8.11.

pentru transformatoare de forţă cu două înfăşurări, precum şi tensiunile de scurtcircuit corespunzătoare curenţilor de scurtcircuit indicaţi. În cazul cînd tensiunea nominală de scurtcircuit a unui transformator este mai mare decît valoarea dată în tabelul 8.11, curentul de scurtcircuit simetric raportat este redus în mod corespunzător, iar durata admisibilă de scurtcircuit creşte.

În cazul transformatoarelor din grupele de conexiuni Yz sau Dz, pot apărea curenţi de defect mai mari la scurtcircuite monofazate pe partea de joasă tensiune decît la scurtcircuite trifazate, deoarece impedanţa de secvenţă homopolară a înfăşurărilor în zig-zag este de obicei foarte redusă.

Funcţionarea în paralel

Condiţiile pentru funcţionarea în paralel a transformatoarelor sînt:

1) grupe de conexiuni cu acelaşi indice numeric;

2) rapoarte de transformatoare pe cît posibil egale;

3) tensiuni de scurtcircui diferite cu maximum ± 10% faţă de valoarea medie la toate unităţile ce trebuie să funcţioneze în paralel;

4) raportul puterilor nominale sub 3 : 1.

Transformatoarele aparţinînd grupelor de conexiuni cu indicii numerici 5 şi 11 pot funcţiona în paralel în cazul cînd conexiunile sînt transpuse în mod corespunzător.

În cazul funcţionării în paralel pe aceleaşi bare colectoare, trebuie să se verifice ca impedanţele conexiunilor să fie aproximativ egale.

În cazul cînd funcţionarea în paralel nu se realizează pe bara colectoare, ci numai prin impedanţe de interconectare într-o reţea, sînt admisibile abateri mai mari decît cele indicate la punctele 2, 3 şi 4.

Capacitatea de supraexcitare şi şocul de curent de magnetizare

Măsura în care transformatoarele pot fi supraexcitate este determinată de fluxul maxim admisibil. O dată cu mărirea fluxului, curentul de mers în gol şi armonicele sale cresc, şi în acelaşi timp cresc şi pierderile în miezul de fier, în înfăşurări şi în elementele constructive. Fluxul este proporţional cu tensiunea aplicată şi invers proporţională cu frecvenţa acestei tensiuni.

Se admit următoarele abateri pe partea de alimentare: tensiunea aplicată poate avea o abatere permanentă de ± 5% faţă de tensiunea nominală, iar frecvenţa poate avea o abatere permanentă de ± 2,5% faţă de frecvenţa nominală.

Supraexcitarea admisibilă a transformatoarelor şi duratele corespunzătoare se pot obţine din fig. 8.58 cu ajutorul funcţiei $\frac{U/f}{U_N/f_N}$, în care: U este tensiunea pe partea alimentării; f — frecvenţa acestei tensiuni; U_N — tensiunea nominală a înfăşurării pe partea alimentării; f_N — frecvenţa nominală. În cazul cînd variaţiile de frecvenţă sînt $\pm 2{,}5\%$ se ia $f \approx f_N$.

La punerea sub tensiune a transformatoarelor poate apărea un curent mărit, cu amplitudine exponenţial descrescătoare. Mărimea acestui şoc de curent depinde de valoarea instantanee a tensiunii şi de magnetismul remanent al transformatorului în momentul punerii sub tensiune.

Tabelul 8.12 indică valorile maxime ale amplitudinii iniţiale a şocului de curent pentru transformatoare mono şi trifazate la mers în gol în raport cu valoarea de vîrf a curentului nominal. Cifrele sînt valabile pentru transformatoare cu înfăşurări cilindrice concentrice. În cazul punerii sub tensiune a înfăşurării exterioare (în mod normal înfăşurarea de înaltă tensiune), curenţii care apar sînt considerabil mai mici decît în cazul punerii sub tensiune a înfăşurării interioare (în mod normal înfăşurarea de joasă tensiune). Pe lîngă valorile pentru tole cu cristale orientate —tipul exclusiv folosit în prezent —

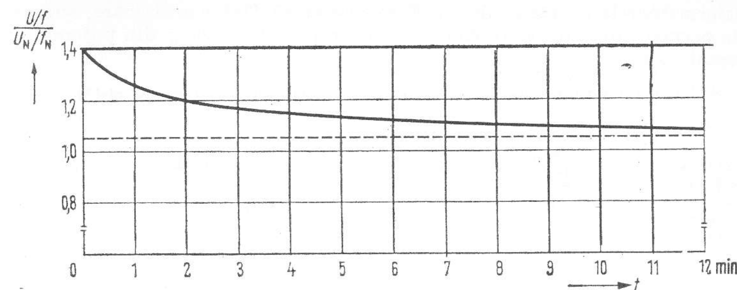


Fig. 8.58. Supraexcitarea admisibilă a transformatoarelor.

tabelul prezintă, în scopuri comparative, şi curenţii de şoc ai transformatoarelor cu tole cu cristale neorientate, tip folosit în trecut.

Tabelul 8.12. Curentul de şoc al transformatorului cu înfăşurări cilindrice concentrice (Valoarea maximă a curentului de şoc/valoarea de vîrf a curentului nominal)

Putere nominală kVA	Tole cu cristale orientate		Tole cu cristale neorientate	
	Punere sub tensiune a		Punere sub tensiune a	
	Înfăşurării exterioare	Înfăşurării interioare	Înfăşurării exterioare	Înfăşurării interioare
500	11,0	16	6,0	9,4
1000	8,4	14	4,8	7,0
5000	6,0	10	3,9	5,7
10 000	5,0	10	3,2	3,2
50 000	4,5	9	2,5	2,5

Pentru puteri cuprinse între 500 şi 1 000 kVA, amplitudinile curenţilor de şoc se reduc la jumătate din valoarea lor iniţială după 8—10 perioade. În cazul unităţilor cu puteri de 1 000—10 000 kVA, această amortizare necesită 10—60 perioade, iar pentru puteri mai mari 60...3600 perioade.

Capacitatea de supraîncărcare

Transformatoarele se pot supraîncărca în mod temporar sau permanent, în funcţie de sarcina iniţială, de temperaturile agenţilor de răcire şi de valorile maxime admisibile ale temperaturilor înfăşurărilor. În cazul depăşirii temperaturilor admisibile ale înfăşurărilor, durata normală de viaţă a transformatorului se scurtează, în afară de cazul cînd supraîncărcarea este compensată de o perioadă de sarcină mai redusă. În cazul cînd transformatoarele urmează să fie supraîncărcate este important să se verifice în prealabil dacă toate elementele componente ale transformatorului şi echipamentului său sînt capabile să corespundă cerinţelor ce li se impun (de exemplu izolatoarele de trecere, regulatoarele de tensiune şi cutiile terminale ale cablurilor).

Tabelul 8.13 conţine valori reprezentative pentru perioada de supraîncărcarea a transformatoarelor în ulei în raport cu sarcina anterioară şi cu temperatura uleiului la începutul supraîncărcării. Temperaturile medii ale înfăşurărilor nu depăşesc 105°C, dacă temperatura medie a agentului de răcire în perioada respectivă este de 25°C. În cazul

cînd transformatoarele cu răcire de tip S funcţionează fără ventilatoare, suprasarcinile şi sarcinile permanente anterioare trebuie să fie raportate la 60% din puterea nominală a transformatorului.

Tabelul 8.13. **Durata de supraîncărcare a transformatoarelor în ulei**[1])

Sarcina de durată anterioară, în %, din puterea nominală	Temperatura uleiului la începutul supraîncărcării, în °C, pentru modul de răcire		Durata supraîncărcării pentru o suprasarcină, în % din puterea nominală, de:				
			10%	20%	30%	40%	50%
	L S	FL FS FA	h	h	min	min	min
50	55	49	3	1,5	60	30	15
75	68	60	2	1,0	30	15	8
90	78	68	1	0,5	15	8	4

[1]) Prevederile STAS 1703—66 sînt identice cu cele din acest tabel

Tabelul 8.14 cuprinde valori reprezentative pentru perioada de supraîncărcare a transformatoarelor de tip uscat cu materiale izolante din clasa A în raport cu sarcina anterioară. Se presupune că înfăşurările sînt în contact direct cu curentul de aer. Condiţiile care se aplică agentului de răcire şi temperatura medie a înfăşurărilor sînt aceleaşi ca în tabelul 8.13. În cazul transformatoarelor de tip uscat cu izolaţie din clasa E şi B perioadele de supraîncărcare indicate în tabelul 8.13 trebuie să fie reduse respectiv la 90% şi 85%.

Tabelul 8.14. **Durata de supraîncărcare a transformatoarelor de tip uscat** [1])

Sarcina de durată anterioară, în % din puterea nominală	Durata supraîncărcării pentru o suprasarcină, în % din puterea nominală de:				
	10%	20%	30%	40%	50%
	min	min	min	min	min
50	60	30	20	15	12
75	55	23	15	11	9
90	45	16	10	7	5

[1]) Cu izolaţie A (v. tabelul 8.9)

În cazul cînd temperaturile aerului diferă de valorile standardizate folosite ca bază pentru dimensionarea transformatoarelor (v. pag. 478) transformatoarele în ulei cu răcire cu aer pot fi supuse la încărcări permanente indicate în tabelul 8.16.

Zgomotul transformatoarelor

Zgomotul transformatoarelor este produs în principal de magnetostricţiunea miezului de fier. El depinde de flux. Variaţii de 10% ale fluxului produc o variaţie de 2—3 dB a nivelului de zgomot în domeniul inducţiilor de 12—16 kGs. Spectrul sonor radiat este între 100 şi 500 Hz.

Tabelul 8.17 indică nivelele admisibile de zgomot ale transformatoarelor în ulei şi ale transformatoarelor de tip uscat. Valorile cuprind toate sursele de zgomot existente la transformator.

Tabelul 8.15. a. **Transformatoare de forţă trifazate, în ulei, cu înfăşurări de cupru şi răcire naturală, la 50 Hz**

Putere nominală kVA	Curentul de mers în gol, în % din curentul nominal		Pierderi la mers în gol W			Pierderi în sarcină la 75 °C W		Tensiunea de scurtcircuit, în % din tensiunea nominală	
	pînă la		pînă la			grupa de conexiuni		pînă la	
	R 20 N	R 30 N	R 10 N	R 20 N	R 30 N	Y y O	Yz 5/Dy5	R 20	R 30
100	2,6	—	320	340	—	1950	2150	4,0	—
100 [1])	2,5	—	320		—	1750		4,0	—
160	2,4	—	455	480	—	2800	3100	4,0	—
160 [1])	2,3		460		—	2350		4,0	—
250	2,3	—	670		—	4100		4,0	—
250 [1])	2,1	—	650		—	3250		4,0	—
250	2,1	2,3	610		650	4600	4450	6,0	
400	2,1	—	960		—	6000		4,0	—
400 [1])	1,9	—	930		—	4600		4,0	—
400	1,8	2,0	850		900	6450		6,0	
630	2,0	—	1350		—	8400		4,0	—
630 [1])	1,8	—	1300		—	6500		4,0	—
630	1,6	1,7	1200		1260	8700	9300	6,0	
1000	1,4	1,5	1750		1800	12 300	13 500	6,0	
1600	1,3	1,4	2550		2600	18 000	19 800	6,0	

Observaţii. 1. Prizele reglabile fără tensiune sînt prevăzute pe partea de înaltă tensiune: ± 2,5% (în cazul cînd această valoare este insuficientă, ± 4%), la tensiunea de scurtcircuit de 4%; ± 5% la tensiunea de scurtcircuit de 6%.

2. Joase tensiuni nominale şi grupele de conexiuni aferente: 231 V pînă la 400 kVA — grupa de conexiuni Yyo;400 V pînă la 200 kVA — grupa de conexiuni Yz5; peste aceste valori — Dy5, 525 V — grupa de conexiuni YyO; 3150 şi 6300 V (numai la tensiune de scurtcircuit 6% şi puteri nominale de la 630 kVA), grupa de conexiuni YyO.

3. Curenţii de mers în gol indicaţi sînt valorile medii pentru înfăşurările trifazate.

[1]) Transformatoare din seria standardizată a Pieţii Comune Europene.

Tabelul 8.15, b. **Transformatoare cu înfăşurări de aluminiu, cu răcire naturală şi reglaj al tensiunii fără sarcină, fabricate de uzinele Electroputere**

Puterea nominală kVA	Curent de mers în gol %	Pierderi la mers în gol W	Pierderi la mers în scurtcircuit W	Tensiunea de scurt-circuit %	Grupa de conexiuni	Reglaj pe ÎT%
100	3,4	480	2760	4	Yz_0 5 Yy_0 12	± 5
160	3,15	685	3720	4	Yz_0 5 Yy_0 12	± 5
250	3	900	5040	6	Dy_0^{-5} Yy_0^{-12}	± 5
400	2,7	1150	6850	6	Dy_0^{-5} Yy_0^{-12}	± 5
630	2,4	1550	9720	6	Dy_0^{-5} Yy_0^{-12}	± 5
1000	2	2100	13 500	6	Dy_0^{-5} Yy_0^{-12}	± 5
1600	1,7	3500	20 200	6	Dy_0^{-5} Yy_0^{-12}	± 5

Tabelul 8.16. **Sarcini permanente admisibile pentru transformatoare în ulei cu răcire cu aer, la temperaturi ale aerului diferite de valorile standard**

Diferenţa temperaturilor aerului faţă de valorile standard		− 20 °C	− 10 °C	0 °C	+ 10 °C	+ 20 °C
Încărcarea permanentă în %, din puterea nominală în cazul modului de răcire	L	121	111	100	91	81
	S	115	109	100	92	83
	FS	115	107	100	92	84

Tabelul 8.17. **Nivelele admisibile de zgomot l a transformatoare**

1. Putere nominală 30 . . . 1600 kVA; distanţa la care se efectuează măsurarea = 1 m

Putere nominală, kVA	30 50	75 100	125 160	200 250	315 400	500 630	800 1000	1250 1600
Nivelul de zgomot pentru transformatoare în ulei, dB(A)	45	46	47	48	50	52	54	56
Nivelul de zgomot pentru transformatoare de tip uscatt dB(A)	54	56	58	60	62	64	—	—

2. Putere nominală 2...40 MVA; distanţa la care se efectuează măsurarea = 3 m.

Puterea nominală, MVA	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40
Nivel de zgomot, dB(A)	52	53	55	56	57	59	60	62	63	65	66	67	69	70

În domeniul valorilor normale de flux nivelele de zgomot se pot reduce cu circa 10 dB prin măsuri de reducere a zgomotului aplicate transformatorului însuşi. Se pot realiza reduceri suplimentare ale zgomotului prin modificări corespunzătoare ale construcţiei transformatoarelor sau prin dispoziţii constructive suplimentare la locurile de instalare.

Standardizarea transformatoarelor

Datele tehnice ale transformatoarelor din cadrul unor anumite domenii de puteri, precum şi dimensiunile, elementele componente şi accesoriile lor sînt standardizate de normele germane (DIN) [1]. Tabelele 8.15 conţin date tehnice standardizate pentru transformatoare de forţă cu puteri nominale cuprinse între 100 şi 1 600 kVA.

Tabelul 8.18 conţine un extras cu date tehnice pentru transformatoare de forţă în ulei cu puteri nominale de 2000—40 000 kVA.

Tabelul 8.18. a. **Transformatoare de forţă trifazate, în ulei, cu înfăşurări de cupru, pentru 50 Hz. Moduri de răcire L, S, FL, FS, FA**

Puterea nominală kVA	Curentul de mers în gol, în % din curentul nominal pînă la R 30 N	R 60 N	R 110 N	Pierderi de mers în gol kW pînă la R 30 N	R 60 N	R 110 N	Pierderi în sarcina la 75 °C kW pînă la R 30 N	R 60 N	R 110 N	Tensiunea de scurt-circuit, în % din tensiunea nominală pînă la R 30 N	R 60 N	R 110 N
2000	1,2	—	—	3,2	—	—	21	—	—	6	—	—
3150	1,0	—	—	4,6	—	—	28	—	—	6	—	—
5000	0,9	1,1	—	6,5	8,0	—	38	41	—	7	8	—
6300	0,9	1,0	1,2	7,7	9,3	11	45	48	53	7	8	10
10 000	0,8	0,9	1,1	11	12,5	14	63	65	72	7	8	10
12 500	0,7	0,8	0,9	13	15	16	77	81	86	10	11	12
20 000	0,6	0,7	0,8	18	20	21	107	112	118	10	11	12
31 500	0,5	0,6	0,7	25	27	29	150	155	162	10	11	12
40 000	0,5	0,6	0,7	30	32	34	180	185	192	10	11	12

Observaţii. Pe partea de înaltă tensiune sînt prevăzute prize de ± 5 %, reglabile fără tensiune. În cazul unor domenii mai extinse de reglaj sau la transformatoare cu reglaj sub sarcină, curenţii de mers în gol, pierderile şi tensiunile de scurtcircuit sînt considerabil mai mari. Conform normelor germane, domeniile de reglaj de ± 11%, ± 16% şi ± 22% determină o majorare de 5% a pierderilor de mers în gol şi o majorare de 10% a tensiunii de scurtcircuit faţă de valorile indicate în tabel. Pierderile în sarcină la funcţionarea pe prizele nominale cresc cu 5% în cazul domeniilor de reglaj de ± 11% şi ± 16% şi cu 7,5% în cazul unui domeniu de reglaj de ± 22%.

Pentru puteri nominale pînă la şi inclusiv 10 MVA şi curenţi de 1200...2400 A, precum şi pentru puteri nominale de 12,5...±50 MVA inclusiv şi curenţi de la 2400 la 4800 A, pierderile în sarcină cresc cu 5%. La transformatoarele cu înfăşurări de stabilizare pierderile în sarcină şi tensiunea de scurtcircuit cresc cu 5%.

Curenţii de mers în gol indicaţi reprezintă valorile medii ale înfăşurărilor trifazate.

[1] În România prin STAS 1703-66.

Tabelul 8.18, b. Transformatoare trifazate, în ulei, cu răcire forţată cu suflaj de aer, fabricate de uzinele „Electroputere"

Puterea nominală kVA	Curentul de mers în gol °/₀	Pierderi de mers în gol kW	Pierderi de mers în scurtcircuit kW	Tensiunea de scurt-circuit °/₀	Grupa de conexiuni	Reglaj pe ÎT °/₀
Transformatoare cu înfăşurări din aluminiu						
10 000	1,3	16,5	69	11	Yod 11	±9×1,78
16 000	1 2	24	97	11		
Transformatoare cu înfăşurări din cupru						
25 000	1,0	26	130	11[1])	Yod 11	±9×1,78
40 000	1,5	42	180	12[1])		
80 000	—	75	300	11,5[1])		

1) La cererea beneficiarului, aceste transformatoare pot fi construite şi pentru valori de 17 °/₀ (STAS 1703 – 67)

8.5. MUTATOARE

8.5.1. Tipuri de mutatoare

După principiul de funcţionare, mutatoarele se împart în:

– *redresoare,* care transformă curentul alternativ (inclusiv cel trifazat) în curent continuu;

– *invertoare,* care transformă curentul continuu în curent alternativ (inclusiv trifazat);

– *convertizoare statice* care transformă curentul alternativ cu o anumită tensiune, o anumită frecvenţă şi un anumit număr de faze în curent alternativ cu alte valori ale acestor mărimi;

– *variatoare de tensiune alternativă,* care reglează circulaţia de energie în circuite de curent alternativ după principiul întîrzierii la amorsare;

– *variatoare de tensiune continuă,* care reglează circulaţia de energie în circuite de curent continuu după principiul comenzii prin variaţia duratei pulsului.

Pentru a face deosebirea între diversele tipuri de mutatoare cu mai multe moduri de funcţionare, caracteristica curent-tensiune pentru partea de curent continuu, care indică semnul tensiunii continue U_d şi al curentului continuu I_d, este împărţită în patru cadrane. În fig. 8.59 acelaşi semn pentru curent şi tensiune indică faptul că se furnizează putere pe partea de curent continuu; aceasta este cazul în cadranele I şi III, corespunzătoare funcţionării în regim de redresor. În cazul cînd semnul curentului direct şi cel al tensiunii continue sînt opuse, se primeşte putere pe partea de curent continuu, ceea ce este valabil pentru cadranele II şi IV, corespunzătoare funcţionării în regim de invertor. Redresoarele şi invertoarele sînt deci mutatoare ale căror caracteristică curent-tensiune se situează într-un singur cadran, şi au numai un singur sens de circulaţie a

Tabelul 8.19. Tipuri constructive de elemente de circuit ale mutatoarelor

Clasificare	Tip	Descriere
Cu vid	Convertizoare cu vid înaintat	Tuburi de sticlă cu vid înaintat cu catod cald, cu sau fără grilă, pentru tensiuni înalte pînă la 100 kV şi mai sus.. Curent: cîţiva miliamperi pînă la circa 1 A. Aplicaţii: raze X, echipament de încercări, cîmp de înaltă frecvenţă.
Mutatoare cu vapori de mercur	Cu catod încălzit	Tuburi de sticlă sau de oţel cu vacuum cu vapori de mercur, sau cu gaz inert, catod cald, fără grilă (redresor), cu grilă (tiratron). Aplicaţii: mutatoare pentru tensiuni înalte pînă la circa 15 kV, curent pe element de obicei sub 20 A
Mutatoare cu vapori de mercur – Cu catod lichid – Cu anozi multipli	Cuvă mare	Cuve de oţel sudate, cu capac în buloane, excitaţie continuă, cu pompă de vid, cu aprindere succesivă, răcire cu apă, 12, 18, 24 anozi şi, în mod normal, grile de comandă. Aplicaţii: în instalaţii de mutatoare ca redresor sau invertor Curent: 3000–8000 A. Tensiune: 500–3000 V.
Mutatoare cu vapori de mercur – Cu catod lichid – Cu un singur anod	Cu excitaţie continuă (Excitron)	Cuvă sudată ermetic, etanşă, de obicei fără pompă, excitaţie continuă, aprindere succesivă, răcire cu apă sau cu aer, grilă de comandă. Aplicaţii: în instalaţii de mutatoare, ca redresor sau convertizor. Curent de convertizor: 30–1000 A Tensiune: 500–3000 V. Tipuri constructive speciale pentru tensiuni foarte înalte.
Mutatoare cu vapori de mercur – Cu catod lichid – Cu un singur anod	Cu electrod de aprindere (ignitron)	Cuvă de oţel sudată ermetic, etanşă, cu vapori de mercur de obicei fără pompă de vid, răcire cu apă sau cu aer. De asemenea cu tub de sticlă, răcire cu aer. Aprindere la fiecare perioadă cu electrod de aprindere, fără excitaţie continuă, unele cu excitaţie auxiliară şi grilă de comandă. Aplicaţii: mutator pentru funcţionare ca redresor sau invertor. Preferabil pentru curenţi pînă la 1000 A, ca întrerupător instantaneu pentru şocuri de curent pînă la 5 kA, de exemplu pentru sudarea prin rezistenţă. Tensiuni pînă la 600 V, construcţii speciale pentru tensiuni mai înalte.

Fără vid	Semiconductoare	Policristal	Necomandate	Plăci redresoare de cuproxid		Între cupru și oxidul de cupru se găsește un strat de mare rezistență, stratul de oxid avînd rolul de pol negativ ,iar placa de cupru de pol pozitiv. Aplicații: redresor de măsurare, supapă de blocare și pentru funcționare ca modulator.
				Plăci redresoare de seleniu	Redresor mic	Strat subțire de seleniu pe placă metalică, iar ca electrod opus aliaj de metal moale aplicat în strat subțire prin pulverizare în aer, strat intermediar de mare rezistență (pol pozitiv). Redresor mic constituit din plăci de format redus. Tip plat pentru 1 V sau bară pentru curenți mici la tensiuni pînă la 10 kV și mai mult, pe coloană
					Coloane redresoare de capacitate mare	Coloane redresoare constituite din plăci de pînă la cîteva sute de cm². Unități pentru curenți pînă la 10 kA la tensiuni joase, pentru curenți mici la tensiuni înalte. Construcții cu răcire forțată cu aer și în ulei.
					Unități pentru tensiuni foarte înalte	Unități de foarte înaltă tensiune construite sub formă de coloane inelare pentru funcționare în aer sau în ulei. Unități cu tensiune inversă de vîrf pînă la 600 kV și mai mult

Fără vid	Semiconductoare	Monocristal	Necomandate	Diode redresoare	Elemente monocristal de germaniu sau siliciu cu două straturi diferit impurificate, Joncțiunea *pn* acționînd ca joncțiune redresoare. Tip constructiv sub formă de celulă în linie sau montată pe o tijă, sau de celulă disc. Temperatura joncțiunii pentru germaniu circa 65 °C, pentru siliciu pînă la 200 °C. Diode redresoare cu siliciu cu curenți nominali pînă la cîteva sute de A, tensiune inversă pînă la 2 kV pe celulă. Curenți măriți pînă la 2 kA pe celulă. Curenți măriți pînă la 40 kA pe unitate redresoare prin conectare în paralel, tensiuni mărite prin conectare în serie. Randament foarte ridicat.
				Tranzistoare	Elemente monocristal de germaniu sau siliciu cu trei straturi diferit impurificate, comandă continuă. Dimensiuni minime. Numeroase aplicații ca amplificator. La funcționare în regim de comutare poate fi folosit ca element de circuit de mutator.
			Comandate	Tiristoare	Elemente monocristal de siliciu cu patru straturi diferit impurificate. Funcționare în sens invers ca diodă redresoare. Comutare cu ajutorul unui puls (pe grilă) de la stare de blocare în stare de conducție. Tip constructiv sub formă de celulă montată pe tijă sau de celulă disc. Temperatura joncțiunii pînă la 120 °C. Curent pe celulă pînă la cîteva sute de A, tensiune inversă pînă la 1500 V pe celulă. Curenți și tensiuni mărite prin conectare în paralel sau în serie. Aplicații la toate tipurile de mutatoare.

Notă. Pe lîngă mutatoarele indicate în tabel, există unele dispozitive cu contacte mecanice sau jeturi rotative de mercur, care însă nu sînt mutatoare propriu-zise.

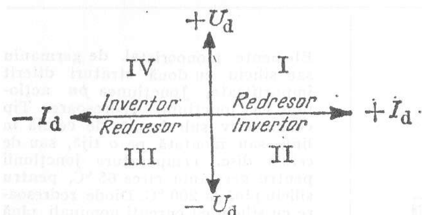


Fig. 8.59. Clasificarea convertizoarelor statice după cadrane pe partea de curent continuu

puterii. Pe lîngă acestea există şi mutatoare care permit inversarea fluxului de putere, dar nu şi a curentului. Ele funcţionează ca mutatoare comutabile cu două cadrane, în cadranele I şi II (fig. 8.59).

Mutatoarele duble, care permit inversarea sensului atît a tensiunii directe, cît şi curentului direct, pot funcţiona ca mutatoare cu patru cadrane, adică în toate cele patru cadrane din fig. 8.59. Ele se compun din mutatoare cu două cadrane, conectate în paralel, acţionînd în sensuri opuse, fiecare pentru un sens al curentului.

Pe lîngă redresoarele şi invertoarele necomandate, se construiesc şi tipuri de mutatoare comandate pentru un singur cadran. Acestea se compun dintr-un redresor comandat sau un invertor comandat.

Redresoarele sau invertoarele necomandate se utilizează adeseori împreună cu unul din următoarele elemente de reglare:

— transformator de reglare pe partea de curent alternativ;
— transductoare pe partea de curent alternativ;
— dispozitive de comandă în curent alternativ pe partea de curent alternativ;
— transductoare în ramurile conexiunii mutatorului;
— dispozitive de comandă în curent continuu pe partea de curent continuu.

Invertoarele comandate din domeniul puterilor superioare pot fi constituite din două invertoare necomandate, tensiunile lor de ieşire legate în serie fiind decalate ca fază una faţă de cealaltă.

În funcţie de modul de comutare mutatoarele se împart în:

— *mutatoare cu comutatie externă*, la care curentul trece din una din ramurile mutatorului în cealaltă, datorită numai acţiunii tensiunii de pe partea de curent alternativ, fără dispozitive speciale de comutare. Mutatoarele cu comutaţie de la reţea sînt deosebit de importante;

— *mutatoare cu comutare internă* (mutatoare cu comutaţie proprie), la care dispozitive speciale de comutare obligă curentul să treacă dintr-o ramură a mutatorului în cealaltă. Aceste dispozitive sînt în principal condensatoare (mutatoare cu comutare prin condensatoare), care furnizează tensiunea şi energia necesară pentru comutare.

În funcţie de tipul comenzii mutatoarele se împart în:

— *mutatoare cu comandă externă*, la care frecvenţa este stabilită de un generator de pulsaţii exterior mutatorului; mutatoarele cu comandă de la reţea sînt în acest caz dintre cele mai importante, reţeaua de curent alternativ comandînd frecvenţa proceselor de comutare;

— *mutatoare cu comandă proprie*, la care frecvenţa este comandată de un generator de frecvenţă inclus în mutator.

8.5.2. Aplicaţii

Mutatoarele sînt întrebuinţate pe scară largă în toate felurile de sisteme de alimentare cu energie pentru industrie, tracţiune, transport şi comerţ.

Cu condiţia de a fi utilizate în mod corect, ele au următoarele avantaje în comparaţie cu maşinile electrice: greutate redusă, construcţie simplă, lipsa pieselor mari în mişcare, dimensiuni reduse; nu necesită fundaţii speciale; nu necesită practic nici un

fel de întreţinere; au un randament tehnic şi economic ridicat; oferă posibilitatea folosirii unor sisteme de comandă mai sensibile, mai rapide sau mai exacte (acest lucru prezintă o deosebită importanţă).

Aceste avantaje sînt în special valabile la mutatoarele cu semiconductoare care, în comparaţie cu cele cu vapori de mercur oferă avantajul suplimentar de a se menţine în funcţiune într-un domeniu de temperaturi foarte larg.

Redresoarele cu semiconductoare se execută în prezent pentru acoperirea întregului domeniu de puteri. La curenţi foarte mici şi tensiuni înalte se preferă seleniul. Restul domeniului de aplicabilitate este acoperit de diode redresoare cu siliciu. Se folosesc redresoare în domeniul puterilor medii pentru alimentarea sistemelor de curent continuu, iar la puteri mari, pentru alimentarea instalaţiilor de electroliză, pentru sisteme de alimentare a căilor ferate sau pentru motoare de tracţiune în sistemele de tracţiune în curent continuu.

Mutatoarele cu funcţionare într-un singur cadran cu comutaţie de la reţea cu tiristoare se adoptă pentru acţionările reglabile cu motoare mici, precum şi pentru încărcarea tuturor tipurilor de baterii. În cazul cînd domeniul de reglaj este restrîns, se recurge la redresoare cu semiconductoare şi reglare prin transductoare.

Mutatoarele simple şi duble cu comutaţie de la reţea se folosesc pentru acţionări de motoare de curent continuu cu un consum ridicat de putere, în special la acţionări reversibile; se construiesc cu tuburi cu vapori de mercur sau cu tiristoare.

Invertoarele cu comutaţie proprie echipate cu tiristoare se folosesc pentru alimentarea aparatajului de curent alternativ de pe vehicule care dispun de energie de curent continuu de la o baterie. În instalaţii fixe o asemenea posibilitate de alimentare în curent alternativ poate asigura şi funcţionarea neîntreruptă în cazul unui defect de alimentare de pe bare; în acest caz invertoarele funcţionează împreună cu baterii şi redresoare de încărcare.

Convertizoarele statice de frecvenţă cu tiristoare pot alimenta de la reţea motoare trifazate cu frecvenţă variabilă. Aceste convertizoare se compun de obicei dintr-un redresor cu comutaţie de la reţea, un circuit intermediar de curent continuu şi un invertor trifazat cu comutaţie proprie; ele oferă posibilitatea unei comenzi a vitezei motoarelor trifazate aproape fără pierderi.

Convertizoarele cu comutare de la sarcină alimentează circuite de medie frecvenţă pentru sisteme de încălzire prin inducţie, fiind echipate fie cu tuburi cu vapori de mercur, fie cu tiristoare.

Variatoarele de tensiune alternativă cu tiristoare comandă tensiunea alternativă în circuite de iluminat (comanda strălucirii), fiind de asemenea folosite pentru reglarea vitezei maşinilor trifazate mici.

Variatoarele de tensiune continuă înlocuiesc reostatele de pornire în acţionările de curent continuu şi permit o reglare a vitezei în mod continuu şi cu pierderi reduse, astfel încît în cazul vehiculelor de tracţiune în curent continuu aderenţa se poate exploata mai eficace.

8.5.3. Tiristoare. Caracteristicile tehnice principale ale tiristoarelor

8.5.3.1. *Definiţii. Structură fizică*

Tiristorul este un ventil electric cu siliciu comandabil, care, în lipsa semnalului de comandă, blochează trecerea curentului în ambele sensuri. La apariţia unui impuls de comandă tiristorul trece în conducţie, permiţînd trecerea curentului într-un singur sens.

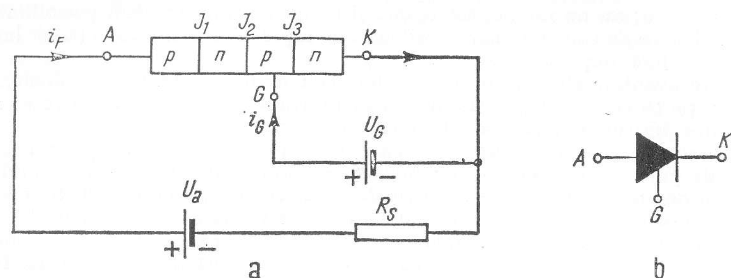


Fig. 8.60. Tiristorul:
a — structura tiristorului; *b* — simbolul de reprezentare al tiristorului; $J_1, J_2 J_3$ — joncţiuni *pn*; *A* — anod; *K* — catod; *G* — grilă; i_F — curent în regim de conducţie; i_G — curent de grilă; U_G — tensiune de grilă; U_a — tensiune anodică; R_S — rezistenţa de sarcină.

În fig. 8.60 se prezintă structura fizică a unui tiristor şi simbolul de reprezentare al tiristorului în schemele electrice. Constructiv, tiristorul prezintă trei joncţiuni *pn* notate în figură cu J_1, J_2, J_3. Primul strat de tip *p* este denumit „anod", iar ultimul strat de tip *n* se numeşte „catod". *Sensul direct* de conducţie al tiristorului este *de la anod spre catod.* Joncţiunea J_3 este joncţiunea de comandă, iar stratul al doilea *p* este numit „grilă de comandă".

Trecerea în conducţie a tiristorului se obţine aplicînd pe grila tiristorului un impuls de comandă de amplitudine şi durată corespunzătoare.

În afara tiristorului propriu-zis, despre care va fi vorba în cele ce urmează s-a realizat în ultimii ani o întreagă gamă de elemente semiconductoare cu caracteristici similare, precum: tiristorul bidirecţional (triacul), tiristorul cu stingere pe grilă (tiristorul GTO), fototiristorul.

8.5.3.2. *Caracteristici tehnice principale*

Curba caracteristică tensiune-curent a tiristorului este prezentată în fig. 8.61. Pe baza acestei curbe se vor defini următoarele mărimi caracteristice ale tiristoarelor, specificate şi în cataloagele firmelor producătoare.

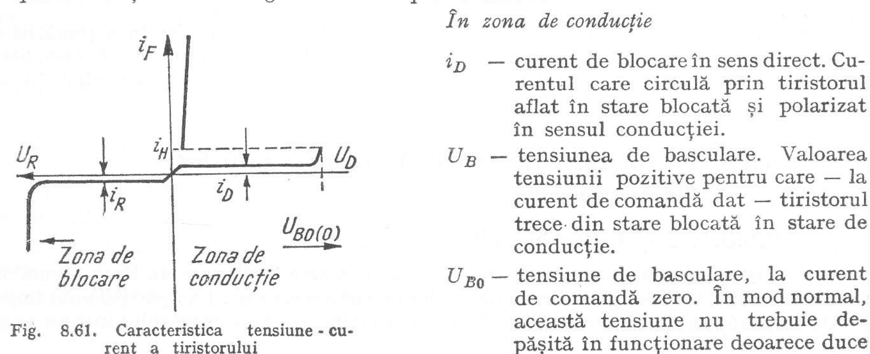


Fig. 8.61. Caracteristica tensiune-curent a tiristorului

În zona de conducţie

i_D — curent de blocare în sens direct. Curentul care circulă prin tiristorul aflat în stare blocată şi polarizat în sensul conducţiei.

U_B — tensiunea de basculare. Valoarea tensiunii pozitive pentru care — la curent de comandă dat — tiristorul trece din stare blocată în stare de conducţie.

U_{B0} — tensiune de basculare, la curent de comandă zero. În mod normal, această tensiune nu trebuie depăşită în funcţionare deoarece duce la trecerea în conducţie a tiristorului, independent de prezenţa impulsului de comandă.

i_H — curent static de menţinere. Curentul minim care trebuie să circule prin tiristor pentru ca tiristorul o dată aprins să rămînă în conducţie.

i_{HD} — curent dinamic de menţinere. Valoarea minimă a curentului anodic care trebuie să se stabilească prin tiristor în momentul trecerii sale în conducţie; această valoare este dependentă de amplitudinea, de forma şi de durata impulsului de comandă, şi este superioară curentului static de menţinere.

i_F — curent de conducţie. Valoarea instantanee a curentului care circulă prin tiristorul aflat în conducţie.

$I_{F(AV)}$ — valoare medie pe o perioadă a curentului de conducţie.

I_N — curent nominal al tiristorului. Valoarea recomandată de fabricant pentru valoarea medie pe o perioadă a curentului de conducţie pentru o schemă monofazată şi sarcină rezistivă. Această valoare este dependentă de radiatorul de răcire ales şi de felul ventilaţiei.

I_{FL} — curent limită de durată. Valoarea medie a curentului de conducţie maxim admis în regim de durată pentru schemă monofazată şi sarcină rezistivă. În cataloagele de tiristoare se prezintă diagrame de variaţie a lui I_{FL} funcţie de temperatura carcasei tiristorului T_G, pentru diferite unghiuri de conducţie.

I^2t — integrală limită de sarcină. Reprezintă valoarea maximă admisibilă a integralei în timp a pătratului curentului prin tiristor, calculată pentru 10 ms şi 1 ms. Este utilă la dimensionarea elementelor de protecţie a tiristoarelor (siguranţe, întreruptoare automate).

În zona de blocare

i_R — curent de blocare în sens invers. Curentul care trece prin tiristorul polarizat în sens invers conducţiei.

U_{DRL}, U_{RRL} — tensiune de vîrf maximă admisă în starea blocată, pozitivă sau negativă, periodică. La alegerea tiristoarelor din punct de vedere al tensiunii admise trebuie să se aibă în vedere pentru U_{DRL}, U_{RRL} un coeficient de siguranţă de 1,5 — 2,5 faţă de tensiunea nominală din circuitul în care lucrează tiristorul. Acest coeficient ţine seama de supratensiunile care apar în funcţionare şi se consideră 1,5 pentru cazurile cînd supratensiunile se pot evalua prin calcul şi 2,5 în celelalte cazuri.

U_{DSL}, U_{RSL} — tensiune de vîrf maximă admisă în sens pozitiv sau negativ, neperiodică. Aceste valori nu trebuie să fie depăşite, nici chiar pentru scurt timp, deoarece duc la distrugerea tiristorului.

Mărimi de comandă

I_G — curent de comandă. Curentul care circulă prin electrodul de comandă (grilă). Este pozitiv cînd intră prin grilă.

U_G — tensiune de comandă. Tensiunea între grilă şi catod.

I_{GTHS} — curent maxim de aprindere. Curentul de comandă capabil să asigure aprinderea tuturor tiristoarelor de un anumit tip trebuie să fie mai mare ca I_{GTHS}.

U_{GTHS} — tensiune maximă de aprindere. Valoarea maximă din plaja de împrăştiere a valorilor tensiunii de aprindere care pot apărea la o serie de tiristoare de acelaşi tip.

U_{GTLS} — tensiune minimă de aprindere. Valoarea minimă din plaja de împrăştiere a valorilor tensiunii de aprindere a unei serii de tiristoare de acelaşi tip.

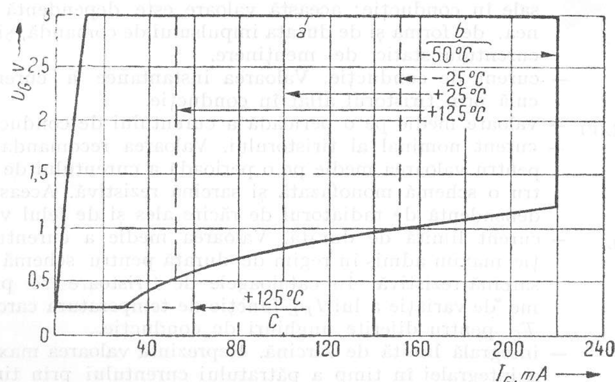


Fig. 8.62. Diagrama de aprindere a tiristorului

Prin diagrama de aprindere a unui tip de tiristor se înţelege cîmpul curbelor de sarcină a joncţiunii de comandă. Domeniul aprinderii posibile este limitat de curentul şi tensiunea maximă de aprindere şi de curentul şi tensiunea minimă de aprindere Acest domeniu este dependent de temperatura joncţiunii T_J.

Caracteristici dinamice

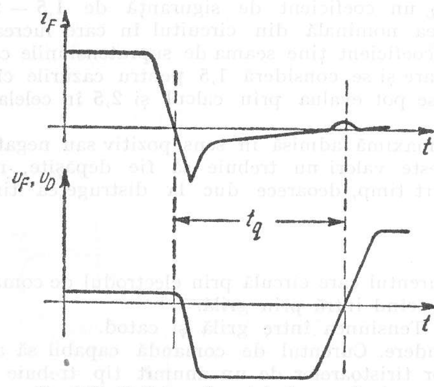


Fig. 8.63. Definirea timpului de revenire t_q.

t_{gt} — timp de aprindere. Intervalul de timp între aplicarea unui impuls de comandă şi momentul în care tensiunea pozitivă de blocare U_D atinge 10% din valoarea sa iniţială.

t_{gd} — întîrziere la aprindere. Durata între aplicarea unui impuls de comandă şi momentul în care tensiunea pozitivă de blocare atinge 90% din valoarea sa iniţială. Micşorarea acestui timp se realizează prin comanda tiristorului cu impulsuri de amplitudine mare şi pantă foarte abruptă.

t_q — timp de revenire. Intervalul minim între anularea curentului prin tiristorul care trece în blocare şi reaplicarea ulterioară a unei tensiuni de semn pozitiv pe tiristor (fig 8.63).

În cazul că tensiunea U_D se aplică din nou după un timp inferior lui t_q tiristorul se reaprinde fără aplicarea unui nou impuls de aprindere. Valoarea timpului de revenire limitează posibilităţile de utilizare a tiristoarelor în domeniul frecvenţelor înalte de lucru.

Constructiv, se realizează tiristoare cu timp de revenire garantat de valoare mică, aşa numite „tiristoare rapide", indicate pentru schemele cu comutaţie forţată (variatoare de tensiune continuă, invertoare).

Pentru schemele cu comutaţie de la reţea (redresoare comandate), se pot folosi „tiristoare lente" cu t_q mai mare decît al celor din prima categorie.

$(du/dt)_{max}$ — viteza maximă admisă de creştere a tensiunii în sensul conducţiei. La depăşirea acestei valori tiristorul poate trece în conducţie fără ca pe grilă să se aplice impuls de comandă.

$(di_F/dt)_{max}$ — viteza maximă admisă de creşterea curentului. La trecerea în conducţie a tiristorului, în primul moment conducţia se realizează printr-o zonă de suprafaţă mică din centrul pastilei tiristorului, propagîndu-se apoi radial cu o viteză finită. Dacă viteza de creştere a curentului depăşeşte anumite limite, în zona centrală apar pierderi suplimentare care duc la încălzirea exagerată a tiristoarelor şi la distrugerea lor. Dacă în circuit apar totuşi creşteri bruşte de curent este necesar să se modifice schema pentru limitarea acestor variaţii.

Ca exemplu sînt date în tabelul 8.20 cîteva tipuri de tiristoare cu caracteristicile lor principale.

Caracteristici termice

T_J — temperatura joncţiunii. Valoarea maximă a acestei temperaturi nu trebuie depăşită pentru a nu se produce distrugerea tiristorului.

T_G — temperatura carcasei.

T_A — temperatura mediului de răcire. În cataloage se indică curentul nominal pentru următoarele temperaturi ale mediului ambiant:
- 45°C, pentru răcire naturală;
- 35°C, pentru răcire forţată cu o viteză a aerului de 6 m/s.

În cazul în care condiţiile de temperatură ale mediului ambiant diferă de cele normale, în cataloage se indică diagrama de variaţie a curentului limită de durată I_{FL} în funcţie de temperatura mediului ambiant T_A.

Dacă tiristorul se utilizează fără radiator sau cu radiator de alt tip decît cel pentru care s-a recomandat curentul nominal, se utilizează diagramele de variaţie a lui I_{FL} funcţie de temperatura carcasei T_G.

Pentru stablirea transferului de căldură între triistor şi mediul ambiant se definesc următoarele rezistenţe termice:

$$R_{thJG} = \frac{T_J - T_G}{P}$$ — rezistenţă termică internă

Diferenţa temperaturilor joncţiunii şi carcasei raportată la pierderile totale P. Este o mărime care caracterizează capsula propriu zisă a tiristorului.

$$R_{thGA} = \frac{T_G - T_A}{P}$$ — rezistenţă termică externă

Tabelul 8.20. **Caracteristicile principale ale citorva tipuri de tiristoare mai frecvent utilizate**

TIP	Firma	I_{FL} la T_J= 89 °C A	I_N A ventilație naturală	I_N A ventilație forțată	i^2t A²·s t = 10 ms T_J= 125 °C	i^2t A²·s t = 1 ms T_J=125 °C	i_D, i_R T_J=125 °C mA	i_H la T_J= 25 °C mA	i_{HD} la T_J = 25 °C mA	U_{DRL} U_{RRL} V	I_{GTHS} T_J= 25 °C mA	U_{GTHS} T_J = 25 °C V	t_{gd} T_J = 25 °C µs	t_q T_J = 125 °C µs	$(du/dt)\ max$ T_J = 125°C V/µs	$(di_F/dt)\ max$ A/µs
T 50 N 700 EOH, cu radiator KL 42	AEG-RFG	50	30	55	2450	1200	20	300	630	700	100	3	9	40...80	400	25
T 95 F 900 EEC cu radiator KL 91	AEG-RFG	95	55	110	16 000	8000	30	300	600	900	100	3	3,5	<20	400	20
T 160 N 1400 EOB, cu radiator KL 91	AEG-RFG	160	70	160	61 000	30 500	50	300	800	1 400	250	3	15	50...100	50	20

Notă: Tiristoarele cu indice N sînt de tip „lent" utilizate pentru schemele cu comutație de la rețea iar cele cu indice F de tip „rapid" — utilizate în schemele cu comutație forțată.

Această valoare reprezintă suma rezistențelor termice dintre capsula tiristorului și radiator, a radiatorului și cea dintre radiator și mediul de răcire.

$$R_{thJA} = \frac{T_J - T_A}{P} \text{ — rezistență termică totală.}$$

8.5.3.3. *Protecția tiristoarelor*

Tiristoarele montate într-o instalație trebuie protejate la supratensiunile și suprasarcinile accidentale care pot apărea în funcționare.

Protecție la supratensiuni

Supratensiunile din instalațiile cu tiristoare se pot datora următoarelor cauze:
— supratensiuni provenite din rețeaua de alimentare (prin conectări sau deconectări sau de natură atmosferică);
— conectarea și deconectarea transformatorului redresorului;
— conectarea unor consumatori inductivi;
— efectul de stocaj al tiristorului (inerția tiristorului);
— comanda prin varierea lățimii pulsului, în cazul variatoarelor de tensiune alternativă.

Pentru protecție la aceste tipuri de supratensiuni se folosesc în general grupuri *RC*, în cîteva scheme tipice.

Circuit de protecție pe tiristor

Metoda constă în cuplarea în paralel pe tiristor a unui grup serie *RC* și are ca efect atenuarea supratensiunilor datorate efectului de stocaj. Supratensiunile maxime care apar datorită acestui fenomen sînt funcție de tensiunea, de comutare, de inductanța circuitului de comutare și de curentul care este comutat.

Practic, firmele constructoare recomandă valori pentru grupul *RC* pentru fiecare tip de tiristor, funcție de tensiunea de lucru, sau prezintă diagrame de determinare a valorilor elementelor de protecție.

Circuit de protecție în primarul sau secundarul transformatorului

Protecția în acest caz se face la supratensiunile ce provin din conectarea sau deconectarea transformatorului, cuplarea și decuplarea sarcinii, precum și la supratensiuni provenite din rețeaua de alimentare. Aceste circuite se cuplează de obicei în secundarul transformatorului principal. Pentru calculul elementelor de amortizare se pornește de la ideea că energia înmagazinată în cîmpul magnetic al transformatorului trebuie să fie preluată de către condensatorul din grupul de amortizare.

Relațiile pe baza cărora se calculează capacitățile condensatorului sînt:

$$C = \frac{P_T I_0 \cdot 10^7}{2\pi f(U_{RRL}^2 - U_{max}^2)}, \text{ pentru transformator monofazat;}$$

$$C = \frac{P_T I_0 \cdot 10^7,}{6\pi f(U_{RRL}^2 - U_{max}^2)}, \text{ pentru transformator trifazat,}$$

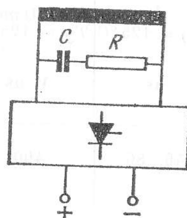


Fig. 8.64. Circuit de protecţie la supratensiuni, în secundarul unui transformator monofazat.

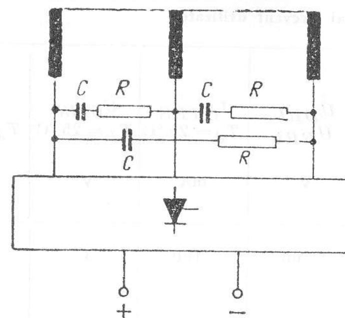


Fig. 8.65. Circuit de protecţie la supratensiuni, în secundarul unui transformator trifazat.

în care: C este valoarea capacităţii condensatorului de amortizare, în μF;
P_T — puterea nominală a transformatorului, în kVA;
I_0 — curentul de mers în gol al transformatorului, în % din curentul nominal (v. tabelul 8.21);
f — frecvenţa reţelei, în Hz;
U_{RRL} — tensiune de vîrf maximă admisă a tiristorului sau diodei, în V;
U_{max} — valoarea de vîrf a tensiunii aplicate pe tiristor sau diodă avînd în vedere şi supratensiunile care pot apărea, în V.

Mărimea şi puterea disipată a rezistenţei de amortizare se deduc din:

$$R \geqslant 2\sqrt{\frac{L_s}{C}}; \quad P = 2(U2\pi fC)^2 \cdot R \cdot 10^{-12}, \quad \text{pentru schema monofazată,}$$

unde: U este valoarea efectivă a tensiunii care se aplică pe grupul de protecţie, în V;
f — frecvenţa tensiunii, în Hz;
R — rezistenţa de amortizare, în Ω;
L_s — inductanţa de scăpări a transformatorului, raportată la acea înfăşurare a transformatorului pe care este cuplat grupul de protecţie, în μH;
C — capacitatea condensatorului de amortizare, în μF.

Tabelul 8.21. Curentul de mers în gol al transformatorului I_0 în funcţie de puterea nominală a transformatorului P_T

P_T kVA	I_0 %
0,1	10
3	5
10	3
100	2,7
200	2,5
500	2
1000	1,6

Formula de calcul a inductanţei de scăpări este

$$L_s = \frac{u_K U^2}{2\pi f \cdot 100 \ P_T}$$

în care L_s este inductanţa de scăpări a transformatorului, în mH;
u_K — tensiunea de scurtcircuit a transformatorului, în %;
U — valoarea efectivă a tensiunii alternative, în V;
f — frecvenţa tensiunii alternative, în Hz;
P_T — puterea nominală a transformatorului, în kVA.

Un caz particular apare cînd redresorul este legat direct la reţeaua de alimentare. În acest caz, în ramurile de alimentare ale redresorului se introduc inductanţe liniare, care limitează supratensiunile nedorite care apar datorită comutărilor din reţea şi limitează în acelaşi timp viteza de creştere a curentului absorbit de la reţea; această inductanţă suplimentară se calculează cu formula

$$L = \frac{u_K \ U}{100 \ I \ 2\pi f}$$

în care: L este inductanţa suplimentară, în H;
u_K — căderea de tensiune pe inductanţă, în procente din tensiunea de linie (se consideră de obicei ca suficientă o valoare de 4%).
U — valoarea efectivă a tensiunii care se aplică pe inductanţă la scurtcircuit, în V;
I — valoarea efectivă a curentului care circulă prin inductanţă, pentru sarcina nominală, în A;
f — frecvenţa reţelei, în Hz.

Protecţia maximală de curent

Protecţia la scurtcircuite se realizează prin utilizarea siguranţelor ultrarapide, concepute în mod special pentru protecţia dispozitivelor semiconductoare (diode cu siliciu, tiristoare).

Aceste siguranţe se pot dispune fie ca siguranţe în serie cu fiecare tiristor, fie ca siguranţe pe partea de alimentare. Cunoscînd schema mutatorului şi curenţii care circulă prin ramurile sale se pot determina curenţii nominali ai siguranţelor.

Alegerea corespunzătoare a elementului de protecţie la supracurent se face comparînd caracteristica acestuia cu cea a tiristorului. O protecţie integrală a tiristorului are în vedere atît protecţia la scurtcircuite cît şi la suprasarcini de durată. Protecţia la scurtcircuite se realizează prin siguranţe, care se aleg astfel încît în permanenţă integrala limită de sarcină (I^2t) a tiristorului să fie superioară celei a siguranţei. În acest mod se evită distrugerea tiristorului la şocuri de curent de scurtă durată.

Pentru protecţia la suprasarcini de durată se utilizează relee termice sau electromagnetice, a căror caracteristică de acţionare trebuie să fie acoperitoare faţă de caracteristica de suprasarcină a tiristorului.

8.5.4. Mutatoare cu comutaţie de la reţea

8.5.4.1. *Definiţii*

Numărul de pulsuri este o caracteristică a unei scheme de mutator, exprimată ca numărul total de comutări succesive în cursul unei perioade. În consecinţă, grupurile de comutare care comută independent unul de altul, au acelaşi număr de comutări q.

În perioada de suprapunere două ramuri ale mutatorului care trebuie să fie parcurse de curent succesiv, sînt parcurse de curent simultan, datorită reactanţelor din circuitul de comutare. În cazul mutatoarelor cu comutaţie de la reţea această reactanţă de comutare este compusă din reactanţa de scăpări a transformatoarelor şi reactanţa sistemului. Această reactanţă compusă este redată prin căderea de tensiune inductivă relativă, u_k, la un curent sinusoidal de aceeaşi valoare efectivă ca şi curentul alternativ care trece prin mutator cînd este încărcat la curentul continuu de sarcină nominal, I_{dN}. Suprapunerea care rezultă este definită ca unghiul iniţial de suprapunere u_0. Fig. 8.67 indică valorile acestui unghi în funcţie de reactanţa de comutare şi de raportul I_d/I_{dN} al curentului continuu de sarcină al mutatorului.

Cînd se consideră mutatoarele din punct de vedere ideal atît această suprapunere, cît şi pierderile se neglijează. În cazul redresoarelor, tensiunea continuă se compune din una sau două semiunde sau din amplitudinile a trei sau mai multe semiunde ale curentului alternativ, cu care este alimentat mutatorul. De aceea, atunci cînd se lucrează cu mutatoare este necesară să se facă distincţie între valoarea medie, valoarea efectivă şi valoarea maximă (amplitudine) a tensiunii şi a curentului.

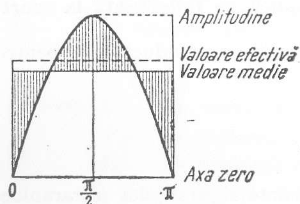


Fig. 8.66. Valori pentru o semiundă sinusoidală.

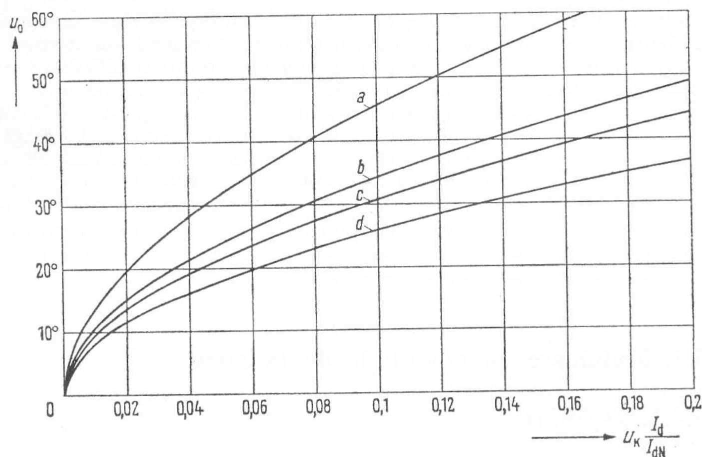


Fig. 8.67. Unghiul iniţial de suprapunere u_0 la tensiunea nominală: *a* — conexiune în dublă stea DS; *b* — conexiune în stea *S*; *c* — conexiune în punte *ρ*; *d* — conexiune în dublă stea cu transformator între faze *DSS*.

De exemplu, o semiundă sinusoidală conform fig. 8.66 cu valoarea maximă 1 are valoarea medie $\frac{2}{\pi} = 0{,}637$ şi o valoare efectivă $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707$. În funcţie de numărul de pulsuri pe perioadă apar diferite valori medii şi efective, indicate în tabelul 8.22 ca rapoarte între tensiuni. Cu cît este mai mare numărul de pulsuri, cu atît valorile medii şi efective ale tensiunii redresate se apropie mai mult de valoarea maximă.

Tabelul 8.22. **Variaţia raportului între diferite valori ale tensiunii în funcţie de numărul de pulsuri**

Raportul între diferite valori ale tensiunii		Numărul de pulsuri p				
		$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$	$p = 6$	$p = 12$
Valoare efectivă / Valoare medie	(factor de formă)	1,57	1,11	1,017	1,0009	1,00005
Valoare maximă / Valoare medie	(factor de vîrf al redresorului)	3,14	1,57	1,21	1,05	1,01

În afară de cazul cînd se specifică altfel, valorile afectate de indicele *d* pe partea de curent continuu reprezintă valori medii, în timp ce cele de pe partea de curent alternativ se dau întotdeauna ca valori efective. Pentru calculul raportului tensiunii continue ideale U_{di} faţă de tensiunea de curent alternativ U_{s0} se poate folosi următoarea formulă generală

$$U_{di} = \sqrt{2} U_{s0} \frac{ms}{\pi} \sin \frac{\pi}{m},$$

în care *s* indică numărul de grupuri de comutare conectate în serie iar *m* este numărul fazelor.

Mutatoarele pot fi comandate prin întîrzierea momentului de amorsare (comandă de fază). Cu ajutorul acestui principiu momentul începerii conducţiei în fiecare ramură a mutatorului este comandat în timpul fiecărei perioade. În cazul mutatoarelor cu comutaţie de la reţea, unghiul de întîrziere α indică cu cît este întîziată în timp amorsarea în comparaţie cu punctul natural la care ar începe conducţia de curent în aceeaşi ramură a unui mutator necomandat. Valoarea unghiului de întîrziere α determină amplitudinea tensiunii continue ideale $U_{di\alpha}$ comandate. Comanda pe întreg domeniul de lucru al mutatoarelor cu două cadrane de funcţionare, de exemplu, şi cu o sarcină inductivă este

$$\frac{U_{di\alpha}}{U_{di}} = \cos \alpha.$$

Tensiunea continuă maximă se obţine la limita domeniului de comandă pentru $\alpha = 0$; pentru $\alpha > 90°$ invertorul produce o tensiune continuă negativă.

Comanda de fază modifică nu numai amplitudinea tensiunii continue, ci şi unghiul de suprapunere. În fig. 8.68 sînt indicate valorile acestui unghi u în funcţie de unghiul iniţial de suprapunere u_0 şi de unghiul de întîrziere α.

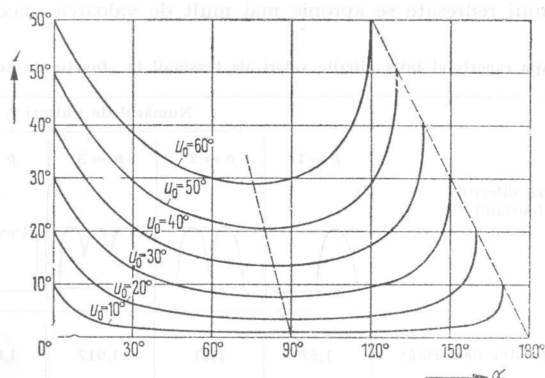


Fig. 8.68. Unghiul de suprapunere u pentru mutatoare cu două cadrane.

Puterea mutatorului pe partea de curent continuu trebuie determinată avînd în vedere următoarele: numai dacă tensiunea sau curentul de pe această parte au o valoare suficient de uniformă, puterea de curent continuu rezultă ca produsul dintre valorile medii ale tensiunii şi curentului continuu. Puterea astfel determinată se numeşte putere de redresare. În cazul redresoarelor aceasta se indică întotdeauna ca puterea produsă pe partea de curent continuu, chiar dacă tensiunea sau curentul nu sînt pe deplin continue (filtrate), deoarece în cele mai numeroase cazuri de aplicare, puterea de curent alternativ suprapusă peste curentul continuu produce numai pierderi nedorite [1].

Date pentru circuitele mai uzuale de mutatoare

Simboluri şi denumiri

U_{dN} este tensiunea continuă la sarcina nominală (valoare medie), în V;

I_{dN} — curentul continuu nominal (valoare medie), în A;

z — numărul de plăci sau de celule conectate în serie pe fiecare ramură a mutatoarelor cu semiconductoare;

s — numărul de grupuri de comutare conectate în serie (tabelul 8.23, rîndul 5);

U_t — partea din tensiunea de conducţie în sens direct, în V, (tensiune de prag), independentă de curent, la un element de circuit al mutatorului (placă, celulă) (tabelul 8.23, rîndul 5).

U_{st} — partea din tensiunea de conducţie în sens direct, în V, a unui dispozitiv cu semiconductoare, dependentă de curent la curentul nominal; se poate neglija la mutatoarele cu tuburi cu vapori de mercur;

[1] Datorită prezenţei armonicelor

D — căderea de tensiune continuă, în %, între mersul în gol U_{d0} şi sarcina nominală U_{dN};

P_v — pierderile în cupru în transformator, inclusiv pierderile ohmice în bobinele şi conductoarele de pe partea de curent continuu, în W;

K — coeficient auxiliar, care indică raportul dintre U_{dN} şi tensiunea continuă ideală U_{di} (tabelul 8.23, rîndul 5);

u_x — componenta inductivă a tensiunii de scurtcircuit a transformatorului, inclusiv a tuturor inductanţelor din circuitul de comutare, în %; se poate folosi în majoritatea cazurilor tensiunea de scurtcircuit a transformatorului;

x — coeficient determinat de circuit pentru reglajul tensiunii inductive (tabelul 8.23, rîndul 5);

α — unghiul de întîrziere al comenzii de fază;

U_{d0} — tensiunea continuă la mers în gol, în V. Valoarea finală a curbei caracteristice prelungită pînă la valoarea zero a curentului (tensiunea continuă convenţională la mers în gol);

U_{di} — tensiunea continuă ideală, neglijînd pierderile şi fenomenul de suprapunere, în V;

U_1 — tensiunea între faze, pe partea dinspre reţea a transformatorului, în V;

U_{s0} — tensiunea pe fază, pe partea dinspre mutator a transformatorului la mers în gol, în V.

În tabelul 8.23 sînt indicate valorile numerice ale principalelor mărimi ale circuitelor mutatoarelor adoptate uzual, în funcţie de care se dimensionează transformatoarele şi elementele de circuit. Aceste valori presupun o tensiune alternativă sinusoidală şi se aplică — în afară de cazul că se specifică altfel — redresoarelor necomandate, cu sarcină ohmică. În cazul cînd sarcina nu este ohmică, valorile din coloanele a ... c se modifică în conformitate cu notele de sub tabel. Abaterile, în cazul circuitelor cu număr de pulsuri mai mare decît cele din coloanele d ... h, sînt mai mici, astfel încît valorile din tabel pot fi în general folosite.

În afara conexiunilor de transformatoare indicate în tabelul 8.23 (v. rîndurile 1 şi 2) se pot alege şi altele. Conexiuni pentru 12 pulsuri se pot obţine prin legarea în paralel a două conexiuni de şase pulsuri decalate cu 30° electrice una faţă de cealaltă prin intermediul unui alt transformator între faze.

În schemele redresorului reprezentate în tabelul 8.23 (rîndul 3) prin simbol se indică întotdeauna o ramură a conexiunii mutatorului.

Tensiunea U_{s0} a transformatorului pe partea dinspre mutator (v. rîndurile 4 şi 5) se dă în funcţie de tensiunea continuă U_{dN}, căderea de tensiune continuă datorită sarcinii fiind luată în consideraţie prin intermediul coeficientului K. Formula dată ca notă la tabel pentru coeficientul K este explicată la paginile 510-511.

Pentru calcule aproximative, valoarea 1,1 pentru coeficientul K este corespunzătoare. În cazul conexiunii dublă stea din coloana h, transformatorul dintre faze îşi pierde efectul de divizor de tensiune la sarcini reduse — sub curentul critic de circa 2% din curentul continuu nominal — astfel încît apare o trecere spre funcţionarea cu şase pulsuri, o dată cu o creştere de 15% a tensiunii continue. Acest vîrf de mers în gol se poate evita cu ajutorul unor inductanţe sau rezistenţe de sarcină suplimentare.

Valorile la care se referă nota 3) pot fi considerate valori limită atunci cînd se foloseşte un condensator de filtrare mare, adică în cazul cînd tensiunea continuă este practic filtrată.

Valoarea efectivă a curentului în conductorul de legătură pe partea mutatorului I_l (v. rîndul 6) este folosită pentru dimensionarea electrică a înfăşurărilor transformatorului a inductanţelor şi conductoarelor.

Tabelul 8.23. Valori pentru calculul celor mai uzuale circuite de mutator (pentru denumiri v.p. 504-505)

		Coloana		a	b	c	d	e	f	g	h	
1		Conexiunea mutatorului		Conexiune monoalternanţă E	Conexiune cu două pulsuri cu punct median M	Conexiune în punte monofazată P	Conexiune în stea S	Conexiune în punte trifazată DP	Conexiune în stea dublă DS	Conexiune cu ramificaţie în furcă	Conexiune în dublă stea cu transformator între faze DSS	1
2		Conexiunea transformatorului		—	—	—	M 3 (Dy 5)	P 3 (Yy O)	M 6 (F_1)	M 6 (F_3)	M6(F_2)	2
3		Schema circuitului										3
		Mărimea cerută	Formula									
4	Transformatoare	U_{s0} Valoarea efectivă a tensiunii alternative la mers în gol pe partea mutatorului	$\frac{U_{s0}}{K\, U_{dN}}$	2,22 0,71 [3])	1,11 1,11 [4])	1,11 0,71 [3])	0,86	0,43	0,74	0,74	0,86	4
5	Transformatoare	K Factorul de diferenţă de tensiune. Valori auxiliare de calcul [1])	$\varkappa$ s	1 1	0,7 1	0,7 2	0,9 1	0,5 2	1,5 1	0,5 1	0,5 1	5
6	Transformatoare	I_l Valoarea efectivă a curentului pe conductor pe partea mutatorului	$\frac{I_l}{I_{dN}}$	1,57 2,5–3,5 [3])	0,79 0,71 [4])	1,11 1,0 [4])	0,59	0,82	0,41	0,41	0,29	6
7	Transformatoare	I_1 Valoarea efectivă a curentului din înfăşurarea primară a transformatorului [2])	$\frac{I_1}{I_{dN}}$	1,21	1,11 1,0 [4])	1,11 1,0 [4])	0,48	0,82	0,58	0,47	0,41	7

		Coloana		a	b	c
		Mărimea cerută	Formula			
8	Transformator	I_L Valoarea efectivă a curentului dintre faze [2])	$\frac{I_L}{I_{dN}}$	1,21	1,11 1,0 [4])	1,11 1,0 [4])
9	Transformator	P_2 Puterea înfăşurării secundare, în kVA	$\frac{P_2}{KU_{dN}I_{dN}}$	3,49	1,75 1,57 [4])	1,23 1,0 [4])
10	Transformator	P_1 Puterea înfăşurării primare, în kVA	$\frac{P_1}{KU_{dN}I_{dN}}$	2,69	1,23 1,11 [4])	1,23 1,11 [4])
11	Transformator	P_{LN} Puterea aparentă nominală absorbită din reţea	$\frac{P_{LN}}{KU_{dN}I_{dN}}$	2,69	1,23 1,11 [4])	1,23 1,11 [4])
12	Transformator	P_T Puterea medie a transformatorului, în kVA	$\frac{P_T}{KU_{dN}I_{dN}}$	3,09	1,49 1,34 [4])	1,23 1,11
13	Ramura de convertizor	I_{zm} Valoarea medie aritmetică a curentului pe ramură	$\frac{I_{zm}}{I_{dN}}$	1,0	0,5	0,5
14	Ramura de convertizor	$\hat{u}_{sp}$ Amplitudinea, valoarea de vîrf sau de creastă a tensiunii inverse ..	$\frac{\hat{u}_{sp}}{KU_{dN}}$	3,14 2[3])	3,14 2[3])	1,57 1[3])
15	Ramura de convertizor	w_i (în % din U_{di}) Ondulaţia ideală a tensiunii pe partea de curent continuu	w_i	121,1 0[3])	48,3 0[3])	48,3 0[3])

[1]) Formula generală $K = 1 + zs\frac{U_v}{U_{dN}} + zs\frac{U_{st}}{U_{dN}} + \frac{P_{Cu}}{U_{dN}I_{dN}} + u_x\varkappa$.

[2]) La raport de transformare $U_1/U_{s0} = 1$.

[3]) În sarcină, fără bobină de filtrare, la tensiune contraelectromotoare (de exemplu baterie, condensator).

Tabelul 8.23 (continuare)

d	e	f	g	h	
0,83	0,82	0,82	0,47	0,41	8
1,51	1,05	1,81	1,79	1,48	9
1,23	1,05	1,28	1,05	1,05	10
1,23	1,05	1,05	1,05	1,05	11
1,37	1,05	1,55	1,42	1,26	12
0,33	0,33	0,17	0,17	0,17	13
2,09	1,05	2,09	2,09	2,09	14
18,3	4,2	4,2	4,2	4,2	15

[4]) Cu bobină mare de filtrare.

Notă. **Valorile fără notă de subsol se aplică strict numai pentru sarcină rezistivă.**

Raportul I_1/I_{dN} este valabil presupunînd că $U_1/U_{s0} = 1$ (v. rîndul 7).

Curentul dintre faze I_L (v. rîndul 8) din reţeaua de curent alternativ determină dimensionarea întreruptorului şi a dispozitivelor de protecţie de pe partea de curent alternativ.

Puterea P_2, în kVA, a înfăşurării secundare a transformatorului (v. rîndurile 9, 10 şi 12) care este determinată de U_{s0} şi I_l se poate calcula din puterea nominală produsă în curent continuu folosind valoarea din tabel; puterea P_1, în kVA, a înfăşurării primare care este determinată de U_1 şi I_1 se poate calcula în acelaşi mod. De aici rezultă puterea medie a transformatorului

$$P_T = \frac{P_1 + P_2}{2}.$$

Puterea aparentă nominală P_{LN} şi puterea P_1, în kVA, a înfăşurării primare (v. rîndurile 10 şi 11) se poate calcula direct din puterea nominală produsă în curent continuu $U_{dN} I_{dN}$.

Notă. La dimensionarea mutatoarelor mari trebuie să se ţină seamă şi de armonicele conţinute în curentul de linie, precum şi de puterea reactivă absorbită de mutatoarele comandate, pentru a calcula puterea instalată. Pot fi adoptate circuite cu o putere reactivă foarte redusă (de exemplu punţi semicomandate).

Valoarea medie aritmetică a curentului pe ramură I_{zm} (v. rîndul 13) este un parametru important în dimensionarea mutatoarelor.

Tensiunea inversă de vîrf $\hat{u}_{sp}$ (v. rîndul 14) are o importanţă hotărîtoare pentru alegerea conexiunii mutatorului şi pentru numărul de plăci sau celule care trebuie să fie legate în serie. În prospectele redresoarelor cu seleniu sau cuproxid se dă de obicei valoarea efectivă a tensiunii alternative maxime admisibile, adică $\hat{u}_{sp}/\sqrt{2}$ ca o indicaţie a capacităţii de blocare.

Prospectele pentru celule de germaniu sau siliciu dau tensiunea inversă de vîrf maxim admisibilă pe celulă care, datorită supratensiunilor, trebuie să fie mai mare cu un coeficient de siguranţă apreciabil faţă de valoarea ce revine fiecărei celule din valoarea de vîrf a tensiunii inverse ($\hat{u}_{sp}$).

Ondulaţia ideală w_i (v. rîndul 15) a tensiunii redresate este raportul dintre valoarea efectivă a tensiunii ideale alternative suprapuse şi tensiunea continuă ideală U_{di} în cazul unei sarcini pur ohmice; acest raport determină dimensiunile elementului de filtrare. Valorile din tabel, care nu ţin seamă de reglarea tensiunii continue sînt valabile pentru funcţionarea necomandată. În cazul mutatoarelor comandate, valorile se măresc considerabil o dată cu scăderea valorii tensiunii continue.

8.5.4.2. *Curbe de sarcină, coeficientul de diferenţă de tensiune K*

Valorile de bază folosite în cazul adoptării valorilor din tabelul 8.23 sînt curentul continuu nominal I_{dN} şi tensiunea continuă nominală asociată U_{dN}. Pentru calcularea tensiunii transformatorului pe partea dinspre mutator (rîndul 4 din tabelul 8.23) trebuie să se ţină seamă de valoarea căderii de tensiune pe tiristor în sens direct independentă de curent şi de diferenţa dintre tensiunea redresată la mers în gol şi la mers în sarcină; aceste valori trebuie să fie adăugate la valoarea tensiunii continue cerute la sarcina nominală (pentru denumiri v. pag. 504-505...).

În condiţii de funcţionare apropiate de mersul în gol al mutatorului, tensiunea de mers în gol (convenţională) este

$$U_{d0} = U_{dN} + D \tag{8.34}$$

Căderea de tensiune D cuprinde cîţiva termeni care ţin seama de diferite pierderi ce depind de curent

$$D = zs\, U_{st} + \frac{P_{Cu}}{I_{dN}} + u_x U_{dN}. \tag{8.35}$$

Tensiunea redresată ideală U_{di} diferă de tensiunea continuă de mers în gol U_{d0} cu valoarea căderii de tensiune pe tiristor în sens direct U_v dependentă de sarcină

$$U_{di} = U_{d0} + ze\, U_v \tag{8.36}$$

Semnificaţia diferitelor valori ale tensiunii este ilustrată de curba de sarcină din fig. 8.69.

Pentru simplificarea calculului, în practică se defineşte un coeficient de diferenţă de tensiune K ($K > 1$), după cum urmează

$$U_{di} = U_{dN} K. \tag{8.37}$$

Din ecuaţiile (8.34) şi (8.37) rezultă

$$K = 1 + zs\frac{U_v}{U_{dN}} + zs\frac{U_{st}}{U_{dN}} + \frac{P_{Cu}}{U_{dN}\, I_{dN}} + u_x\varkappa. \tag{8.38}$$

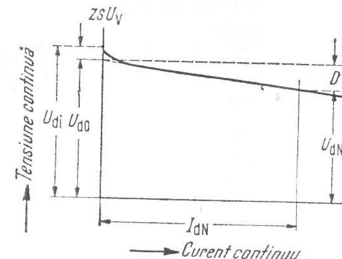


Fig. 8.69. Variaţia tensiunii unui mutator cu comutare de la reţea.

Coeficientul K se aplică la redresoarele necomandate, sau la cele comandate la tensiunea continuă maximă de ieşire (unghi de întîrziere $\alpha = 0$) şi sarcină nominală. În funcţie de tipul şi de conexiunea mutatorului, se întîlnesc în mod normal valori de ordinul 1,03 ... 1,15. În cazul şocurilor de sarcină apar valori a lui K mult mai mari, care în cazul mutatoarelor comandate trebuie să fie avute în vedere printr-o rezervă corespunzătoare în domeniul de comandă.

În funcţie de tipul constructiv şi de dimensiunile tuburilor cu vapori de mercur, valorile lui U_v variază între 18 şi 30 V, însă la tiratroane mici ajunge numai pînă la circa 12 V, iar la redresoare de înaltă tensiune are valoarea de aproximativ 50 V. Pentru calcule aproximative U_v se poate lua adeseori 20 V, iar U_{st} se poate neglija. În general, nu se întîlnesc mai multe tiristoare conectate în serie pe o singură ramură, astfel încît z poate fi egal cu 1.

În cazul mutatoarelor cu semiconductoare se întîlneşte conectarea în serie pe aceeaşi ramură a mai multor plăci sau celule. Căderea de tensiune pe element în sens direct se înmulţeşte atunci cu numărul z al plăcilor sau celulelor conectate în serie.

Fracţiunea dependentă de curent U_{st} este căderea medie de tensiune în timpul perioadei de conducţie pe o ramură, minus tensiunea de prag U_v. În cazul unei tensiuni redresate puternic filtrate U_{st} se poate determina din valoarea căderii de tensiune în sens direct la curentul continuu nominal I_{dN}. În funcţie de conexiunea mutatorului, numărul de pulsuri, caracterul sarcinii şi tipul răcirii, porţiunea dependentă de curent variază între 0,22 şi 0,55 V pe placă de seleniu, porţiunea fixă U_v fiind evaluată la circa 0,6 V pe placă la redresoarele de putere. În cazul diodelor redresoare cu siliciu se consideră $U_{st} = 0{,}3$ V, iar $U_v = 0{,}7$ V pe celulă, la temperatura de funcţionare normală. Tensiunea U_v a diodelor redresoare cu germaniu este ceva mai redusă, iar numărul de celule care se conectează în serie la tensiuni înalte este mai mare.

Determinări mai exacte ale valorilor se pot obţine cu ajutorul caracteristicilor de conducţie care se pot găsi în prospectele de fabrică. Fig 8.70 şi 8.71 prezintă caracteristicile de conducţie ale unei plăci redresoare de seleniu şi ale unei diode redresoare cu siliciu la două temperaturi diferite.

Pentru diode redresoare cu siliciu şi tiristoare caracteristica de conducţie poate fi aproximată printr-o dreaptă echivalentă cu ajutorul ecuaţiei

$$u_F = U_s + R_{dif}\, i_F.$$

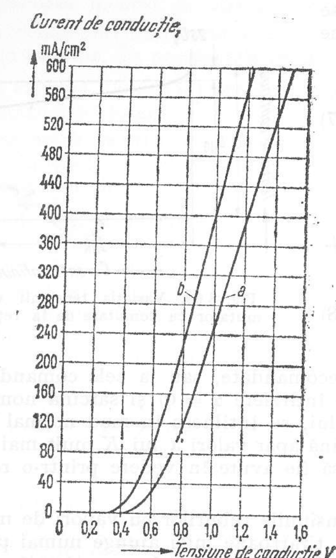


Fig. 8.70. Caracteristicile de conducţie ale unei plăci redresoare cu seleniu: *a* — la temperatura mediului (20°C); *b* — la temperatura medie de funcţionare (70°C).

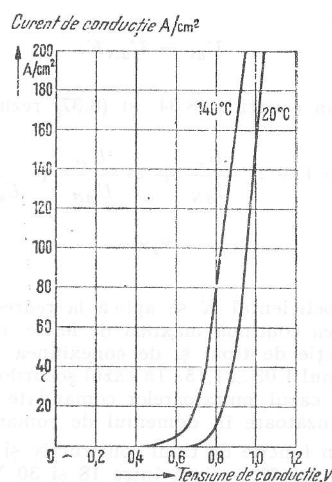


Fig. 8.71. Caracteristicile de conducţie ale unei diode redresoare cu siliciu raportată la 1 cm² de suprafaţă de placă (valori instantanee ale curentului direct şi ale căderii de tensiune în sens direct).

Tensiunea de prag U_s reprezintă porţiunea independentă de curent U_v a căderii de tensiune în sens direct u_F, în timp ce porţiunea dependentă de curent U_{st} este reprezentată ca produs dintre rezistenţa dinamică de conducţie R_{dif} şi valoarea instantanee a curentului direct i_F.

8.5.4.3. *Pierderi de conducţie*

Cu tot randamentul excepţional al mutatoarelor cu siliciu, densitatea mare de putere pe celulă determină pierderi considerabile. Acestea se compun din pierderi de conducţie, pierderi de blocare şi pierderi de comutare. În cazul tiristoarelor este necesar să se adauge pierderi în circuitul de grilă şi pierderi de blocare în sens direct. Capacitatea de preluare a curentului este determinată în acest caz în primul rînd de pierderile de conducţie

$$P_F = U_s I_F + R_{dif}\,(f I_F)^2.$$

În această ecuaţie se introduce curentul mediu prin celulă în locul lui I_F, iar f — factorul de formă — se ia din curba din fig. 8.72, în funcţie de forma undei de curent şi de unghiul de conducţie λ. În cazul redresoarelor acest curent mediu corespunde valorii medii pe ramură I_{zm} din tabelul 8.23.

$$f = \frac{I_{F\,ef}}{I_F},$$

$$I_{F\,ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int i^2\, dt},$$

$$I_F = \frac{1}{T}\int i\, dt.$$

În cazul în care unda curentului direct are o alură mult diferită de dreptunghi sau sinusoidă, pierderile în funcţie de timp se determină din valorile instantanee ale curentului i_F şi ale căderii de tensiune în sens direct u_F, din care se poate obţine valoarea medie în timpul perioadei T, de exemplu prin integrare grafică.

Capacitatea sistemelor de răcire, care trebuie să disipeze pierderile termice, este determinată de pierderile de conducţie. În majoritatea cazurilor se foloseşte un element de răcire din cupru sau din aluminiu. Pentru celulele de dimensiuni mai mici este suficientă convecţia naturală, dar pentru unităţile mai mari este de obicei necesară ventilaţia forţată. Echipa-

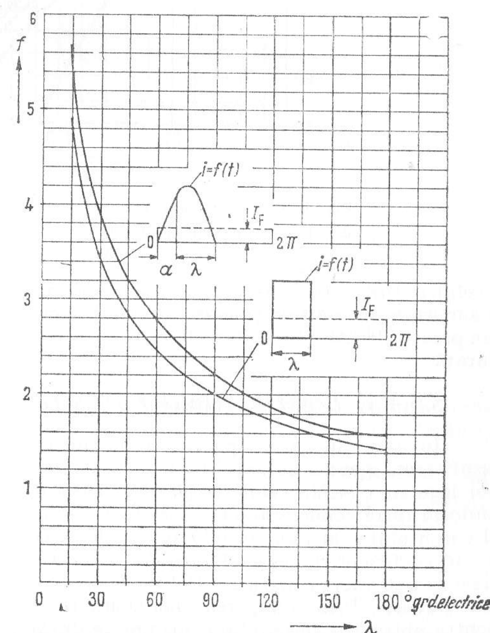


Fig. 8.72. Factorul de formă *f* în funcţie de unghiu de conducţie λ.

mentele de foarte mare putere necesită o răcire cu lichid cu circulaţie forţată, agentul de răcire fiind uleiul sau apa deionizată, a căror răcire are loc în schimbătoare de căldură prin care trece apă brută sau aer.

Eficacitatea răcirii se verifică prin măsurarea temperaturii carcasei celulelor. Relaţia dintre temperatura maximă admisibilă a carcasei şi valoarea maximă a curentului mediu este dată de pierderi, de temperatura maximă admisibilă a joncţiunii şi de rezistenţa termică internă a celulei. Temperatura admisibilă a carcasei tiristorului B St L02 este reprezentată grafic în fig. 8.73 pentru cîteva forme de undă de curent şi diferite frecvenţe, ca exemplu de date conţinute în prospecte. Curbele sînt independente de modul de răcire. Trebuie avut în vedere însă că nu se admite o supraîncărcare

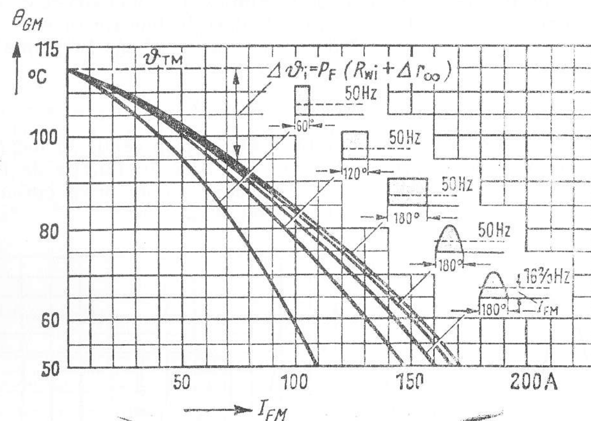


Fig. 8.73. Temperatura maximă admisibilă a carcasei θ_{GM} în funcţie de valoarea maximă a curentului mediu de conducţie I_{FM} al unui tiristor de tip BSt LO2.

a celulei atunci cînd este utilizată la temperatura maximă a carcasei. Suprasarcinile pot fi suportate în limite raţionale, cu condiţia ca mutatorul să fie astfel dimensionat încît temperaturile maxime admisibile să nu fie atinse în timpul funcţionării normale de durată.

8.5.4.4. *Legarea celulelor în serie şi în paralel*

În cazul în care capacitatea de încărcare cu curent a unei anumite celule este insuficientă pentru curentul pe ramură, în conformitate cu tabelul 8.23, de exemplu, se pot lega mai multe celule în paralel. Deoarece curentul total nu se distribuie în mod uniform între celule, curentul continuu admisibil nu reprezintă multiplul corespunzător al curentului continuu considerat fără legarea în paralel: este necesar să se ţină seamă de un coeficient de legare în paralel, a cărui valoare este de obicei 0,8. În cazuri speciale se pot adopta măsuri astfel încît să se obţină factori de legare în paralel cu valori mai ridicate. Prin adăugarea unei celule în plus faţă de cîte sînt necesare în mod real pentru obţinerea curentului continuu de durată, mutatorul poate să funcţioneze la plină sarcină, chiar dacă una din celule se defectează. Această metodă se foloseşte şi în cazul în care sînt de aşteptat suprasarcini la mutator.

Atunci cînd celulele sînt legate în serie, tensiunea inversă nu se distribuie nici ea în mod uniform pe fiecare celulă. Circuitul *RC*, necesar pentru alte motive în cazul celulelor cu siliciu, permite obţinerea unui coeficient de legare în serie de 0,9.

În cazul tiristoarelor şi în cîteva cazuri de aplicare ale diodelor se include şi un divizor de tensiune continuă pur ohmic.

Pe lîngă distribuţiile de curent şi de tensiune mai sus menţionate, trebuie să se ţina seamă de procesele dinamice, a căror importanţă depinde de viteza de variaţie a curentului pe ramură la începutul şi la sfîrşitul perioadei de conducţie. Viteza de creştere a curentului atinge maximul la mutatoarele comandate la începutul comutării, cînd unghiul de întîrziere este $\alpha \approx 90°$. Fig. 8.74 reprezintă reactanţa de comutare în funcţie de vitezele maxime de variaţie a curentului pentru cîteva valori ale curentului continuu, f_u fiind un coeficient determinat de schema mutatorului. Valorile din fig. 8.74 pot fi transformate pentru orice valoare de curent, înmulţindu-se cu puterea corespunzătoare a lui zece atît scara din ordonată, cît şi valorile curentului continuu con-

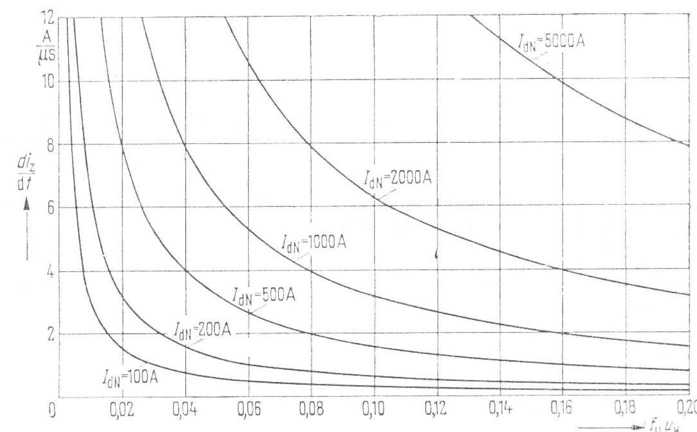


Fig. 8.74. Viteza maximă de variaţie a curentului la 50 Hz, $f_u = 1,0$ în cazul conexiunii *DP*; $f_u = 1,414$ în cazul conexiunii *P*; $f_u = 1,732$ în cazul conexiunii *S*; $f_u = 3,0$ în cazul conexiunii *DS*; $f_u = 2,0$ în cazul conexiunii *DSS*

siderat ca parametru. Viteza maximă de creştere a curentului pe ramură în conexiunea în punte trifazată *DP*, de exemplu, la $u_k = 4\%$ şi cu un curent continuu nominal $I_{dN} = 5$ kA este $di_z/dt = 40$ A/µs.

În cazul conectării în paralel a mai multor celule pentru a se putea face faţă unui curent continuu nominal de valoarea ridicată viteza maximă medie de variaţie a curentului pe celulă este

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{z} \cdot \frac{di_z}{dt}.$$

În practică trebuie să se admită valori cu pînă la 50% mai mari, deoarece celulele legate în paralel nu pot fi montate în mod ideal, astfel încît în ele pot să apară viteze diferite de variaţie a curentului. Vitezele maxime de variaţie a curentului trebuie

să fie cunoscute, de exemplu, pentru determinarea elementelor din circuitul *RC* ținînd seamă de supratensiunile provocate de efectele de stocaj ale purtătoarelor de sarcină.

În cazul în care celulele legate în paralel au siguranțe individuale, distribuția staționară a curentului de durată se poate determina din căderea de tensiune la bornele acestor siguranțe. Este important ca înainte de a se determina curentul pe fiecare celulă valorile măsurate să fie transformate cu ajutorul unei curbe de etalonare adaptată tipului respectiv de siguranțe și unghiului de conducție pe ramură al conexiunii comutatorului. Trebuie de asemenea să se aibă în vedere că suma curenților pe celulă pe o ramură astfel obținuți poate să nu corespundă curentului continuu, din diferite motive. În orice caz, se obține o imagine suficient de corectă a distribuției de curent, dacă valoarea de curent determinată pentru fiecare celulă se raportează la suma acestor curenți. În cazul cînd se folosește curba de etalonare a siguranțelor, distribuția de curent va părea mai defavorabilă decît este în realitate.

Exemple de calcul

Redresor cu semiconductoare

Să se aleagă un redresor cu seleniu [1]) avînd următoarele caracteristici:

$$U_{dN} = 55\ \text{V},\ I_{dN} = 100\ \text{A}$$

pentru racordare la o rețea de alimentare trifazată. Există două dispoziții constructive posibile care utilizează redresoare cu seleniu avînd tensiunea inversă de 25 V pe fiecare placă, cu un coeficient de diferență de tensiune $k = 1{,}1$:

— conexiune în punte trifazată *DP*:
$U_{s0} = 26$ V, deci tensiune în triunghi 45 V;
$z = 2$ plăci în serie;
— conexiune în stea *S*:
$U_{s0} = 52$ V, deci tensiune în triunghi 90 V;
$z = 4$ plăci în serie.

R e z o l v a r e. Dimensiunile și tipul plăcilor care trebuie folosite se pot lua dintr-un prospect de redresoare cu seleniu. Conform tabelului 8.23, rîndul 13, trebuie alese plăci care, montate individual sau în paralel, să poată permite circulația unui curent de ramură I_{zm} de cel puțin

$$I_{zm} = 0{,}33 \cdot I_{dN} = 33\ \text{A}.$$

În cazul cînd nu este necesară legarea în paralel se pot folosi următoarele:
— conexiune în punte trifazată *DP*:
6 ramuri cu cîte două plăci legate în serie pe fiecare, în total 12 plăci;
— conexiune în stea *S*:
3 ramuri cu cîte patru plăci legate în serie pe fiecare, în total 12 plăci.

Numărul necesar de plăci este deci același în ambele variante. Puterea în kVA a transformatorului (tabelul 8.23, rîndul 12) este însă
— în cazul conexiunii trifazată în punte *DP*:

$$P_T = 1{,}05\ K\,U_{dN}I_{dN} = 6{,}35\ \text{kVA};$$

— în cazul conexiunii în stea *S*:

$$P_T = 1{,}37\ K\,U_{dN}I_{dN} = 8{,}28\ \text{kVA}.$$

Deci conexiunea în punte trifazată reprezintă varianta cea mai favorabilă și, de asemenea produce un curent continuu mai uniform, în conformitate cu tabelul 8.23, rîndul 14.

---

[1]) STAS 3034-63 pentru redresoare cu seleniu pînă la 100 A.

Pentru a se determina tensiunea transformatorului, trebuie să fie determinat, conform tabelului 8.23 nota *1*. coeficientul de diferență de tensiune *K*:

$$K = 1 + zs\frac{U_v}{U_{dN}} + zs\frac{U_{st}}{U_{dN}} + \frac{P_{Cu}}{I_{dN}\,U_{dN}} + u_x\chi,$$

unde:

$z = 2$	două plăci pe ramură legate în serie
$s = 2$, $\chi = 0{,}5$	tabelul 8.23, coloana *e* rîndul 5
$U_v = 0{,}6$ și $U_{st} = 0{,}22$	din prospectul redresoarelor cu seleniu
$P_{Cu} = 0{,}03\ U_{dN}\,I_{dN}$	valoarea de proiectare
$u_x = 0{,}08$	valoare de proiectare,

$$K = 1 + \frac{4 \cdot 0{,}6}{55} + \frac{4 \cdot 0{,}22}{55} + 0{,}03 + 0{,}08 \cdot 0{,}5 = 1{,}115.$$

Din tabelul 8.23 rîndul 4, se obține acum valoarea

$$U_{s0} = K\,U_{dN} \cdot 0{,}43 = 1{,}115 \cdot 55 \cdot 0{,}43 = 26{,}4\ \text{V}$$

(în comparație cu valoarea 26 V cu aproximație obținută prin folosirea unui coeficient $K = 1{,}1$).

$$P_T = 1{,}05 \cdot 1.115 \cdot 55 \cdot 100 = 6{,}44\ \text{kVA}.$$

Mutatoare cu tuburi cu vapori de mercur, cu un singur anod

Să se proiecteze transformatorul legat la un circuit hexafazat, cu transformator între faze, cu tensiunea trifazată de linie 30 kV, pentru un redresor cu vapori de mercur, avînd

$$U_{dN} = 880\ \text{V și}\ I_{dN} = 5\,000\ \text{A},$$

conform tabelului 8.23, coloana h.

R e z o l v a r e. Coeficientul de diferență de tensiune *K* are expresia

$$K = 1 + s\frac{U_v}{U_{dN}} + \frac{P_{Cu}}{U_{dN}\,I_{dN}} + u_x\chi$$

unde:

$s = 1$, $\chi = 0{,}5$	tabelul 8.23, coloana *e*, rîndul 5
$U_v = 21$ V	apreciat
$P_{Cu} = 59$ kW	ținînd seama și de bobinele anodice de aprindere, estimate la circa 2% din P_T,
$u_x = 0{,}105$	valoare estimată ținînd seama și de reactanța sistemului și a bobinelor anodice de aprindere

$$K = 1 + \frac{21}{880} + \frac{59\,000}{880 \cdot 5\,000} + 0{,}105 \cdot 0{,}5 = 1{,}09.$$

Tensiunea pe fază U_{so} pe partea mutatorului (rîndul 4) este

$$U_{s0} = 0{,}86\ K\,U_{dN} = 0{,}86 \cdot 1{,}09 \cdot 880\ \text{V} = 825\ \text{V}.$$

Curentul de fază pe partea mutatorului I_l (rîndul 6):

$$I_l = 0{,}29\ I_{dN} = 1\,450\ \text{A}.$$

Acest curent are un rol determinant pentru dimensionarea conductoarelor de pe partea spre mutator a transformatorului care se leagă la anozii individuali.

Curentul primar I_1 (rîndul 7)

$$I_1 = 0,41\, I_{dN} \frac{U_{s0}}{U_1} = 0,41 \cdot 5\,000 \frac{825\sqrt{3}}{30\,000} = 97,5 \text{ A}.$$

Acest curent trebuie să fie cunoscut pentru calculul puterii, în kVA, a înfăşurării primare.

Curentul de linie I_L (rîndul 8):

$I_L = I_1$ deoarece înfăşurarea primară este legată în stea;

$I_L = 97,5$ A.

Acest curent serveşte la dimensionarea legăturilor cu reţeaua, transformatoarelor de curent, a întreruptoarelor etc.

Puterea P_2, în kVA, a înfăşurării secundare (rîndul 9) are valoarea

$$P_2 = 1,48\, K\, U_{dN} I_{dN} = 7\,100 \text{ kVA}.$$

Puterea P_1, în kVA, a înfăşurării primare (rîndul 10) are valoarea

$$P_1 = 1,05\, K U_{dN} I_{dN} = 5\,040 \text{ kVA}.$$

Puterea P_T, în kVA, a transformatorului (rîndul 12):

$$P_T = 1,26\, K\, U_{dN} I_{dN} = 6\,070 \text{ kVA}.$$

Puterea aparentă nominală P_{LN} absorbită din reţea (rîndul 11):

$$P_{LN} = 1,05\, K\, U_{dN} I_{dN} = P_1 = 5\,040 \text{ kVA}.$$

Puterea în kVA a transformatorului trebuie să fie deci 6 070 kVA, în timp ce puterea aparentă care trebuie să fie disponibilă din sistem trebuie să fie de numai 5 040 kVA. Această cifră nu cuprinde puterea consumată de serviciile auxiliare (excitaţie, comanda grilei, răcire etc.).

8.5.4.5. *Invertoare*

Generalităţi

Invertoarele reprezintă o grupă de mutatoare care transformă energia de curent continuu în energie de curent alternativ (inclusiv trifazată).

O clasificare a invertoarelor se poate face după următoarele două criterii: după felul comutării ventilelor şi după felul în care se stabileşte frecvenţa, amplitudinea şi faza tensiunii de ieşire (felul comenzii).

D u p ă t i p u l c o m u t ă r i i există invertoare:

— cu comutaţie de la sarcină;
— cu comutaţie proprie, prin circuit oscilant LC;
— cu comutaţie prin condensator, amorsat printr-un tiristor principal;
— cu comutaţie prin condensator, amorsat printr-un tiristor auxiliar;
— cu comutaţie externă;
— cu comutaţie de la reţea (în cazul redresorului comandat funcţionînd în regim de invertor).

D i n p u n c t d e v e d e r e a l c o m e n z i i deosebim invertoare:

— cu comandă externă — la care amplitudinea, frecvenţa şi faza tensiunii de ieşire se stabilesc din afara invertorului propriu-zis;
— cu comandă proprie — la care amplitudinea, frecvenţa şi faza tensiunii de ieşire se stabilesc în însuşi ansamblul invertorului.

Utilizări

Invertoarele se utilizează în principal în următoarele cazuri:

— în instalaţii cu consumatori în curent alternativ, la care se dispune de o reţea de curent continuu. Acesta este cazul instalaţiilor de pe vehicule, unde sursa de energie este o baterie de acumulatoare;

— în cazurile în care pentru alimentarea consumatorilor este necesară o tensiune mai stabilă ca amplitudine şi frecvenţă decît cea a reţelei de curent alternativ;

— în toate cazurile unde este necesară o alimentare continuă a consumatorilor, indiferent de incidentele din reţeaua de alimentare în curent alternativ (centrale electrice, instalaţii de telecomunicaţii, alimentarea calculatoarelor electronice etc.)

Schema de principiu de alimentare cu siguranţă mărită cu invertor este reprezentată în fig. 8.75. Atîta timp cît este posibilă alimentarea de la reţea, elementul de sesizare *ES* comandă contactoarele $C_1 \ldots C_3$ în poziţiile indicate cu linie continuă. Prin aceasta, consumatorul este alimentat direct din reţea prin C_2, iar redresorul *R*, alimentat prin C_1, menţine în tampon bateria *B*, alimentînd invertorul *I* care funcţionează în gol. În momentul dispariţiei tensiunii reţelei, elementul de sesizare comandă contactoarele $C_1 \ldots C_3$ trecîndu-le în poziţia reprezentată în figură prin linie punctată. Invertorul funcţionează cu alimentarea de la baterie şi furnizează tensiune consumatorilor. Pauza în alimentarea sarcinii este de ordinul a cîteva zecimi de secundă. La reapariţia tensiunii reţelei, invertorul este decuplat pe partea de ieşire, iar redresorul reintră în funcţiune, încărcînd bateria care s-a descărcat în timpul regimului anterior.

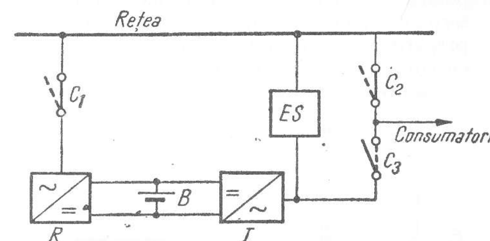


Fig. 8.75. Schemă de principiu de alimentare cu siguranţă mărită cu invertor.

Scheme de invertoare

Invertoare monofazate. Cele mai utilizate scheme de invertoare monofazate sînt: s c h e m a c u p u n c t m e d i a n şi s c h e m a î n p u n t e.

S c h e m a c u p u n c t m e d i a n este utilizată la puteri şi tensiuni continue de alimentare mai reduse.

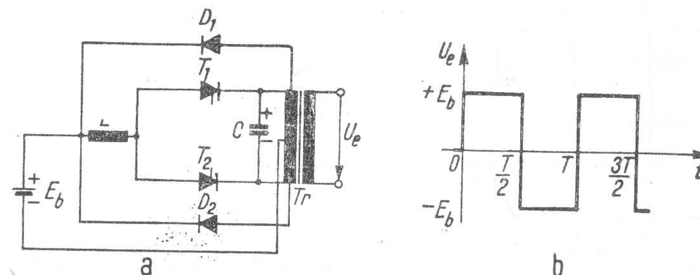


Fig. 8.76. Invertor în schemă cu punct median: *a* — schema de principiu; *b* — forma de undă a tensiunii de ieşire.

În schema din figura 8.76 cele două tiristoare T_1 şi T_2 sînt comandate cu impulsuri de comandă decalate între ele cu 180° electrice, corespunzătoare la 1/2 T. Presupunînd că în primul moment conduce T_1, pe jumătatea superioară a primarului transformatorului Tr se aplică tensiunea de alimentare E_b, iar în secundar (presupunînd un raport de transformare 1 : 1) apare aceeaşi tensiune E_b, cu semn pozitiv. Condensatorul C s-a încărcat cu polaritatea din figură la tensiunea 2 E_b. După intervalul de timp $\frac{T}{2}$ se aplică un impuls de comandă pe T_2, care trece în conducţie. Condensatorul C se descarcă prin circuitul C, T_2, T_1, blocîndu-l pe T_1. În cea de a doua semiperioadă, pe jumătatea inferioară a primarului Tr se aplică E_b, cu polaritatea inversă faţă de prima semiperioadă, rezultînd în secundar a doua semialternanţă a tensiunii de ieşire. Condensatorul se încarcă cu polaritatea inversă, fiind pregătit pentru următorul proces de comutare. Rolul inductanţei L este de a limita curentul care este absorbit din sursă în timpul trecerii conducţiei de pe un tiristor

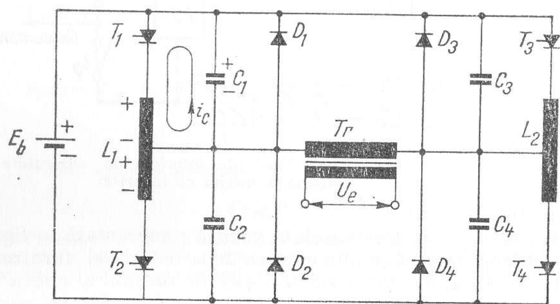


Fig. 8.77. Invertor în punte monofazată. Schemă de principiu.

pe celălalt, intervenind şi în procesul comutării. Pentru ca invertorul să poată funcţiona pe sarcină reactivă s-au introdus diodele de recuperare D_1 — D_2, care permit recuperarea energiei reactive în sursa de curent continuu.

S c h e m a î n p u n t e. Comanda celor două tiristoare din fiecare pereche (T_1 — T_2 sau T_3 — T_4 din fig. 8.77) se realizează cu impulsuri de comandă decalate între ele la 180° electrice, comanda lui T_1 şi T_4, respectiv T_2 şi T_3 (fig. 8.78) făcîndu-se concomitent. În semiperioada în care conduc T_1 şi T_4 în secundarul transformatorului Tr se obţine semiunda pozitivă a tensiunii de ieşire, iar cînd conduc T_2 şi T_3 polaritatea tensiunii de ieşire se schimbă. Amorsarea stingerii tiristorului care conduce — de exemplu T_1 şi T_4 — are loc în momentul intrării în conducţie a tiristorului T_2 respectiv T_3. Se va descrie un proces de comutare pentru perechea de tiristoare T_1 — T_2, considerînd în primul moment tiristorul T_2 în conducţie. În acest timp condensatorul de comutare C_1 s-a încărcat la tensiunea E_b cu polaritatea din figură.

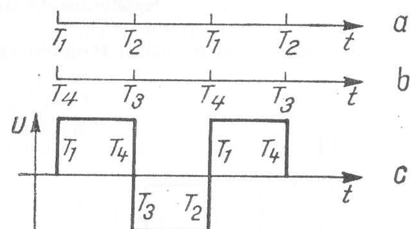


Fig. 8.78. Forma de undă a tensiunii de ieşire a invertorului din fig. 8.77: *a* — impulsuri de aprindere pentru perechea de tiristoare T_1 — T_2; *b* — impulsuri de aprindere pentru perechea de tiristoare T_3 — T_4; *c* — forma de undă a tensiunii de ieşire.

Din momentul în care T_1 primeşte comanda de aprindere, condensatorul începe să se descarce prin circuitul compus din C_1, T_1 şi jumătatea superioară a bobinei de comutare L_1, pe care apare o cădere de tensiune cu polaritatea din figură. Datorită cuplajului magnetic a celor două jumătăţi a bobinei de comutare, în porţiunea inferioară apare o tensiune indusă, care se aplică ca tensiune de stingere pe tiristorul T_2, blocîndu-l. Pentru perechea T_3 — T_4 fenomenele de comutare decurg similar, datorită grupului de comutare C_3 — C_4—L_2. Pentru funcţionare cu sarcină reactivă s-a introdus în antiparalel redresorul format din diodelele D_1 — D_4.

Invertoare trifazate. În cazul în care este necesară alimentarea unor consumatori trifazaţi se poate realiza un invertor trifazat prin cuplarea a trei invertoare monofazate de tipul celor descrise mai sus (fig. 8.79)

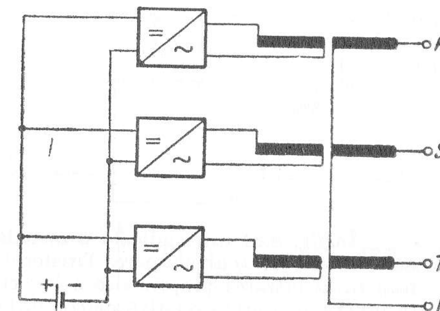


Fig. 8.79. Schema de principiu a unui invertor trifazat compus prin cuplarea a trei invertoare monofazate.

Cele trei invertoare monofazate se alimentează în paralel de la aceeaşi sursă de curent continuu, tensiunile lor de ieşire fiind cuplate printr-un transformator trifazat. Impulsurile de comandă pentru fiecare invertor sînt decalate cu 120° faţă de celelalte invertoare

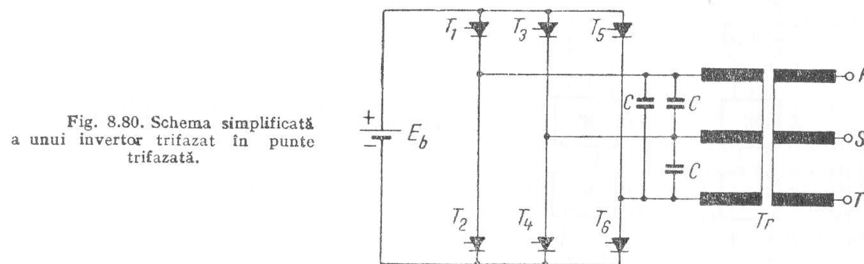


Fig. 8.80. Schema simplificată a unui invertor trifazat în punte trifazată.

În fig. 8.80 este reprezentată schema simplificată a unui invertor trifazat, în punte trifazată. Tiristoarele T_1. . . T_6 sînt comandate printr-o schemă de comandă cu şase pulsuri, care furnizează impulsuri de comandă într-o succesiune corespunzătoare obţinerii în secundarul transformatorului Tr a unei tensiuni alternative trifazate.

Reglarea tensiunii de ieşire a invertorului

În majoritatea aplicaţiilor industriale se impune menţinerea constantă a tensiunii de ieşire a invertorului, indiferent de variaţiile tensiunii de alimentare sau de variaţiile sarcinii. Principial, pentru reglarea tensiunii de ieşire a invertoarelor se dispune de următoarele procedee:

— reglarea tensiunii pe partea de intrare;
— reglarea tensiunii pe partea de ieşire;
— reglarea tensiunii în invertorul propriu-zis.

Reglarea tensiunii pe partea de intrare. Această metodă presupune varierea tensiunii continue de alimentare a invertorului în corelaţie cu valoarea tensiunii de ieşire.

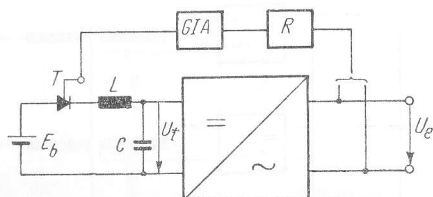


Fig. 8.81. Principiul de reglare a tensiunii unui invertor prin comutator electronic în circuitul de curent continuu GIA — generator de impulsuri de aprindere; *R* — regulator.

În fig. 8.81 este indicată o metodă utilizată în cazul funcţionării invertorului pe o baterie de acumulatoare. Tiristorul *T*, funcţionînd ca un comutator electronic, face ca la intrarea propriu-zisă a invertorului să se aplice o tensiune U_i, variabilă în funcţie de durata relativă de conducţie a lui *T* (raportul impuls-pauză).

Metoda de mai sus este recomandată în special la puteri mici. În cazul cînd invertorul este alimentat printr-un redresor există două posibilităţi de aplicare a acestui procedeu, indicate în fig. 8.82.

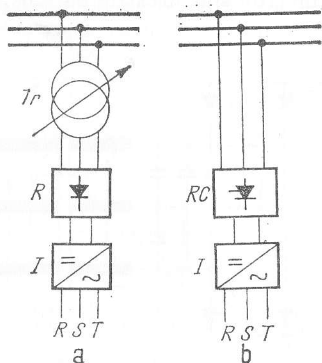


Fig. 8.82. Reglarea tensiunii invertorului prin: *a* — autotransformator; *b* — redresor comandabil cu tiristoare.

Reglarea tensiunii pe partea de ieşire. Principiul de reglare este prezentat în fig. 8.83. La ieşirea invertorului se cuplează în antiparalel două tiristoare T_1, T_2, în montaj de variator de tensiune alternativă, reglînd valoarea efectivă U_e a tensiunii de ieşire pe principiul întîrzierii momentului de aprindere faţă de punctul natural de aprindere al tiristorului.

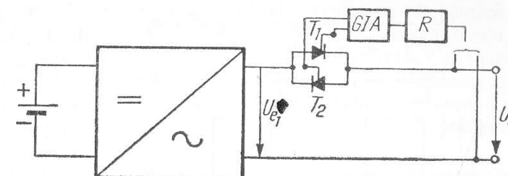


Fig. 8.83. Principiul de reglare a tensiunii invertorului prin variator de tensiune alternativă pe partea de ieşire; *GIA* — generator de impulsuri de aprindere; *R* — regulator.

Pentru puteri mici de ieşire reglarea tensiunii pe partea de ieşire se poate realiza printr-un stabilizator magnetic.

Reglarea tensiunii în invertorul propriu-zis. O metodă de reglare a tensiunii de ieşire, a cărei justificare economică apare mai evident în cazul unor invertoare de putere mai mare şi care deci necesită conectarea în paralel a mai multor tiristoare, este realizarea invertorului din două invertoare parţiale de putere mai mică, alimentate în paralel pe partea de curent continuu şi legate în serie pe partea de curent alternativ (fig. 8.84).

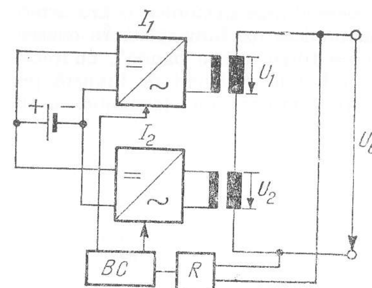


Fig. 8.84. Principiul de reglare a tensiunii prin cuplarea în serie a două invertoare parţiale.

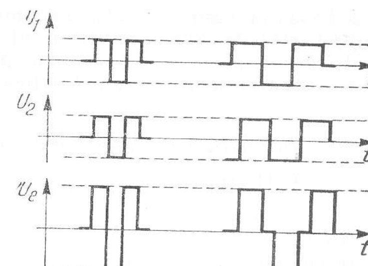
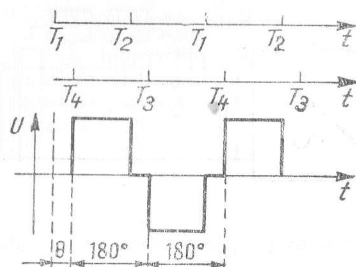


Fig. 8.85. Variaţia tensiunii invertorului compus din două invertoare parţiale.

Regulatorul *R*, care urmăreşte menţinerea constantă a valorii lui U_e, comandă în mod corespunzător blocul de comandă *BC*, care furnizează impulsurile de comandă necesare funcţionării corecte a celor două invertoare. În funcţie de semnalul de la regulator, blocul de comandă decalează impulsurile corespunzătoare unui invertor în raport cu cele corespunzătoare celuilalt, obţinînd în acest mod varierea valorii efective a tensiunii de ieşire (fig. 8.85).

Din această figură rezultă că prin mărirea unghiului de decalaj θ se obţine o scădere a valorii efective a tensiunii de ieşire pentru aceeaşi valoare a tensiunii de alimentare.

Invertorul reprezentat în fig. 8.77 se pretează la un mod de reglare a tensiunii prin variaţia fazei impulsurilor de comandă pentru perechea de tiristoare $T_3 - T_4$, după cum rezultă din fig. 8.86.


Fig. 8.86. Variaţia tensiunii invertorului prin comanda decalată a tiristoarelor.

Şi în acest caz, prin varierea unghiului de decalaj θ se obţine o variaţie corespunzătoare a tensiunii de ieşire.

Pentru invertoarele trifazate problema reglării tensiunii în cazul funcţionării pe o sarcină trifazată se reduce la reglarea amplitudinii tensiunilor pe faze. În cazul în care invertorul este încărcat neuniform pe cele trei faze se pot realiza următoarele situaţii:

— se menţine constantă amplitudinea tensiunii pe fiecare fază, schimbîndu-se în acest caz fazele celor trei fazori;

— se menţine constantă relaţia de fază, dar se modifică repartiţia tensiunilor pe faze

Filtrarea tensiunii de ieşire

Forma tensiunii din secundarul transformatorului invertorului este dreptunghiulară. În majoritatea aplicaţiilor se cere însă la ieşirea invertorului o formă de undă cît mai apropiată de sinusoidă. Din analiza Fourier a unei tensiuni alternative dreptunghiulare rezultă că cea mai mare pondere dintre armonice o are armonica a treia; aproximativ 33% din amplitudinea armonicei fundamentale. În consecinţă pe partea de ieşire a invertorului se va cupla un filtru „trece bandă", cu frecvenţa de rezonanţă egală cu cea a fundamentalei şi cu o bandă suficient de îngustă pentru a atenua armonica de amplitudine maximă şi frecvenţă minimă (armonica a treia).

8.5.4.6. *Convertizoare de curent continuu*

Definiţie. Generalităţi

Convertizoarele de curent continuu reprezintă categoria de mutatoare care transformă energia de curent continuu cu anumite caracteristici (tensiune, curent) în energie de curent continuu cu alte valori ale acestor caracteristici.

În aplicaţiile industriale se întîlneşte o gamă largă de convertizoare de curent continuu, puterile nominale variind între ordinul waţilor şi zecilor de kilowaţi. Pentru puteri mici şi tensiuni de alimentare sub 100 V se realizează convertizoare cu tranzistoare, în timp ce la tensiuni de peste 5 000 V este recomandată folosirea tuburilor cu vapori de mercur (tiratroane, ignitroane). Convertizoarele de curent continuu cu tiristoare acoperă gama intermediară acestor situaţii limită.

Din punct de vedere al principiului de funcţionare, se disting două grupe principale de convertizoare de curent continuu:

— cu circuit intermediar de curent alternativ;

— fără circuit intermediar de curent alternativ (variatoare de tensiune continuă).

Convertizoare de curent continuu, cu circuit intermediar de curent alternativ

Aceste convertizoare se realizează prin combinarea schemelor de redresor şi invertor descrise anterior. Invertorul care intră în componenţa unui convertizor de acest tip este alimentat la tensiunea continuă U_{C1} şi furnizează la ieşire tensiunea alternativă U_a. Redresorul se poate alimenta direct sau printr-un transformator de la această tensiune, tensiunea sa de ieşire U_{C2} fiind şi tensiunea de ieşire a convertizorului de curent continuu. Pentru astfel de scheme sînt recomandabile invertoare cu tensiune de ieşire cu formă de undă dreptunghiulară, deoarece pentru filtrarea tensiunii U_{C2} este necesar un filtru mult mai simplu dimensionat.

Varierea tensiunii de ieşire a convertizorului se poate realiza în cele mai diferite moduri, folosind metodele de variere a tensiunii de ieşire a invertorului sau redresorului descrise la capitolele respective.

Avantajele pe care le oferă acest tip de convertizor de curent continuu constau în gama largă de variere a tensiunii de ieşire, deosebita uşurinţă de obţinere a oricăror tensiuni de ieşire pentru cele mai variate tensiuni de alimentare şi în separarea galvanică care se realizează între intrare şi ieşire. Ca un dezavantaj trebuie menţionat randamentul relativ scăzut, datorat transformării energiei în două etape: în invertor şi apoi în redresor.

Convertizoare de curent continuu, fără circuit intermediar de curent alternativ (variatoare de tensiune continuă)

Variatoarele de tensiune continuă funcţionează pe principiul varierii lăţimii pulsului.

Întreruptorul S din fig. 8.87 se închide la intervale de timp egale T, pe rezistenţa de sarcină R_S aplicîndu-se tensiunea continuă de alimentare U_C. După un interval de timp τ de la fiecare comandă de închidere a lui S acesta este redeschis,

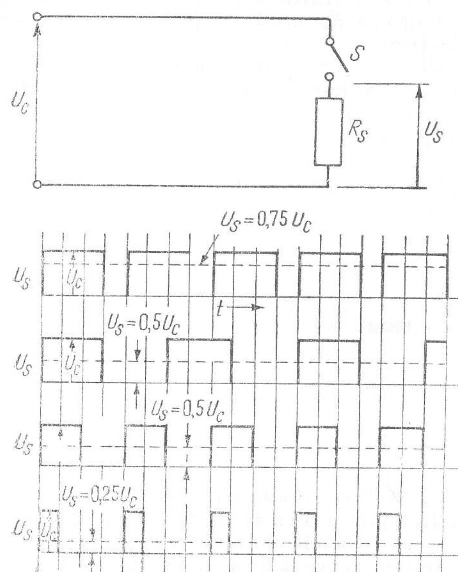


Fig. 8.87. Principiul comenzii prin varierea lăţimii pulsului

întrerupînd alimentarea sarcinii. Raportul dintre timpul τ în care S este închis şi perioada de comutare T este denumit *durată relativă de conducţie*, a

$$a = \frac{\tau}{T}, \qquad a \leqslant 1.$$

Valoarea medie a tensiunii pe sarcină U_S, pentru aceeaşi tensiune de alimentare, depinde de durata relativă de conducţie prin relaţia

$$U_S = a\ U_C, \qquad U_S \leqslant U_C.$$

Din această relaţie rezultă că tensiunea medie maximă de sarcină nu poate depăşi valoarea tensiunii de alimentare. Mai mult decît atît, în fig. 8.87 s-au considerat procese de comutare ideale, care decurg instantaneu. În cazul unei analize reale, a nu poate atinge nici valoarea zero şi nici unitatea, limitînd astfel gama de variaţie a tensiunii de ieşire.

Practic varierea duratei relative de conducţie se poate realiza prin următoarele procedee: cu frecvenţă de lucru constantă (T = constant, τ = variabil); cu frecvenţă de lucru variabilă (T = variabil, τ = constant); cu varierea concomitentă a perioadei T şi a duratei de conducţie τ.

La un variator de tensiune continuă real, funcţia întreruptorului S este realizată de un întreruptor electronic realizat cu tiristoare; acestea se aprind şi se sting la intervale de timp stabilite printr-un dispozitiv de comandă, în funcţie de tensiunea de ieşire impusă.

Prin comparaţie cu convertizoarele de c.c. cu circuit intermediar de c. a. variatoarele de tensiune continuă au următoarele dezavantaje, care rezultă din însuşi principiul lor de funcţionare:

- gama de variaţie a tensiunii de ieşire mai redusă;
- tensiunea maximă de ieşire nu poate depăşi valoarea tensiunii de alimentare;
- tensiunea de intrare şi cea de ieşire au un punct comun.

Avantajul principal al metodei este randamentul ei ridicat, datorită transformării directe a energiei.

În cele ce urmează se vor prezenta cîteva scheme de principiu ale variatoarelor de tensiune continuă.

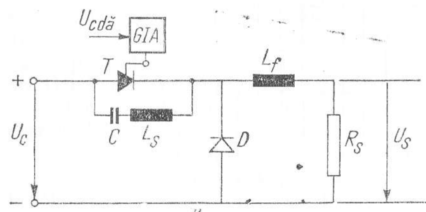


Fig. 8.88. Variator de tensiune continuă, cu frecvenţă de lucru variabilă.

Variatorul din fig. 8.88 are o schemă principială identică cu cea din fig. 8.87 în care s-a înlocuit întreruptorul S cu tiristorul T şi grupul de comutare $C-L_S$. La aplicarea unui impuls de comandă furnizat de generatorul de impuls GIA, tiristorul începe să conducă şi valoarea instantanee a lui U_S devine egală cu U_C. Condensatorul de comutare C se descarcă prin circuitul compus din C, T, L_S, ducînd după un anumit timp la blocarea lui T şi la decuplarea sarcinii de la sursa

de alimentare. În plus faţă de schema din fig. 8.87 s-a introdus bobina de filtrare L_f şi dioda de descărcare D. Dioda de descărcare este o cale de închidere pentru curentul de sarcină în intervalul de timp în care T_1 este blocat, iar bobina de filtrare L_f se introduce pentru filtrarea curentului de sarcină.

Regimul de lucru al acestui variator este cu frecvenţă variabilă. Intervalul de timp τ în care tiristorul conduce este fix şi depinde de tensiunea de alimentare şi de dimensionarea bobinei saturabile L_S. Varierea tensiunii de ieşire se obţine prin varierea frecvenţei impulsurilor de comandă pentru tiristor, frecvenţă dată de generatorul de impulsuri funcţie de tensiunea de comandă $U_{cdă}$.

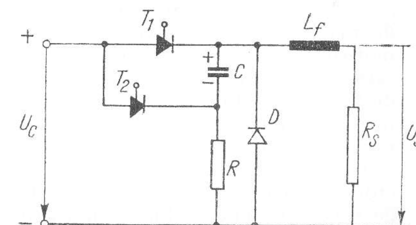


Fig. 8.89. Variator de tensiune continuă cu frecvenţă de lucru fixă.

Schema din fig. 8.89 funcţionează cu frecvenţa de lucru constantă, varierea tensiunii de ieşire obţinîndu-se prin varierea duratei de timp în care tiristorul T_1 rămîne în conducţie. În momentul în care apare un impuls de comandă pe grila lui T_1, tensiunea de alimentare se aplică pe sarcină şi — în acelaşi timp — condensatorul de comutare C se încarcă la tensiunea U_C cu polaritatea din figură. Blocarea tiristorului principal este amorsată în momentul aplicării unui impuls de comandă pe tiristorul auxiliar T_2; prin trecerea în conducţie a lui T_2 tensiunea condensatorului C se aplică ca tensiune inversă pe T_1, blocîndu-l. La apariţia unui nou impuls de comandă pentru T_1 condensatorul se reîncarcă la $+U_C$, fiind pregătit pentru un nou proces de comutare. Varierea duratei relative de conducţie a tiristorului T_1 se realizează prin decalarea impulsurilor de comandă pentru T_2 faţă de impulsurile de comandă pentru T_1.

8.5.4.7. *Convertizoare de curent alternativ*

Definiţie. Generalităţi

Convertizoarele de curent alternativ reprezintă categoria de mutatoare care transformă energia de curent alternativ cu anumite caracteristici (tensiune, frecvenţă) în energie de curent alternativ cu alte valori ale acestor caracteristici.

Din punct de vedere al principiului de funcţionare, se disting două grupe principale de convertizoare de curent alternativ;

- cu circuit intermediar de curent continuu (convertizoare statice de frecvenţă);
- fără circuit intermediar de curent continuu (variatoare de tensiune alternativă, cicloconvertoare).

Convertizoare de curent alternativ, cu circuit intermediar de curent continuu (convertizoare statice de frecvenţă)

Acest tip de convertizor se realizează prin cuplarea la ieşirea unui redresor alimentat de la tensiunea alternativă monofazată sau trifazată U_{a1} a unui invertor care furnizează la ieşire o tensiune monofazată sau trifazată U_{a2}. Circuitul intermediar de curent continuu — aflat între ieşirea redresorului şi intrarea invertorului cuprinde un filtru de curent continuu compus dintr-o bobină de filtrare în serie şi un condensator în paralel cu intrarea invertorului. Cu un asemenea convertizor de frecvenţă se pot modifica concomitent amplitudinea şi frecvenţa tensiunii de ieşire.

Utilizările cele mai frecvente ale convertizoarelor de curent continuu de tipul de mai sus sînt acţionările reglabile ale motoarelor de curent alternativ. În cazul motoarelor asincrone alimentarea cu tensiune de amplitudine şi frecvenţă variabilă este asigurată de un convertizor compus dintr-un redresor cu tiristoare cu comutaţie de la reţea, — prin comanda căruia se realizează varierea tensiunii din circuitul intermediar de curent continuu şi prin urmare şi a tensiunii de ieşire a convertizorului — urmat de un invertor cu comutaţie proprie. Prin comanda frecvenţei invertorului se realizează variaţia frecvenţei de alimentare a motorului. Pentru ca motorul asincron să-şi păstreze caracteristicile statice (în special cuplul maxim) în întreaga gamă de turaţii trebuie ca fluxul învîrtitor în maşină să rămînă constant; acest lucru se realizează prin varierea simultană şi corelată a amplitudinii şi frecvenţei tensiunii de alimentare a motorului asincron.

Convertizoare de curent alternativ, fără circuit intermediar de curent continuu (variatoare de tensiune alternativă, cicloconvertoare)

Schema de funcţionare a unui variator de tensiune alternativă monofazat este reprezentată în fig. 8.90, *a*, în care variatorul propriu-zis este compus din tiristoarele cuplate în antiparalel T_1 şi T_2. Tiristoarele primesc periodic impulsuri de la generatorul de impulsuri *GI*, impulsuri decalate cu un unghi α faţă de momentele de comutare naturale, rămînînd în conducţie pînă cînd valoarea instantanee a tensiunii de alimentare corespunzătoare tiristorului în conducţie devine negativă.

După cum rezultă din fig. 8.90, *b*, prin modificarea lui α se realizează modificarea formei tensiunii şi curentului de sarcină. Pentru sarcină rezistivă curentul de sarcină poate fi variat între valoarea sa maximă U/R (corespunzător $\alpha = 0°$ el) şi zero ($\alpha = 180°$ el).

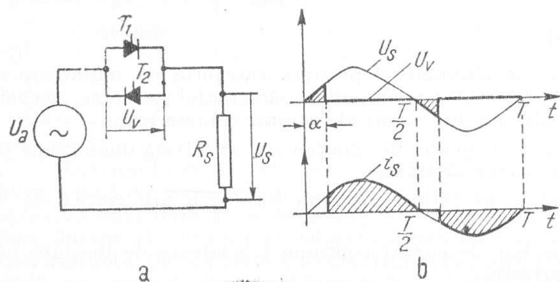


Fig. 8.90. Variator de tensiune alternativă, monofazat: *a* — schema de principiu; *b* — diagrama tensiunii şi curentului de sarcină, pentru sarcină ohmică

Pentru sisteme trifazate, variatorul de tensiune continuă se compune din trei variatoare de tipul de mai sus, dispuse cîte unul pe fiecare fază şi comandate cu impulsuri de comandă decalate de la o fază la alta cu 120° el.

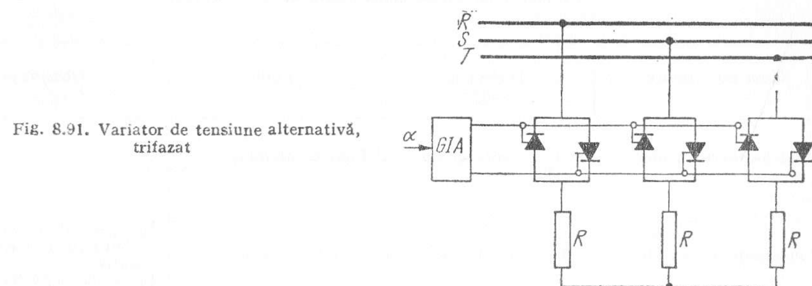


Fig. 8.91. Variator de tensiune alternativă, trifazat

În ultimii ani s-a pus la punct un nou tip de element semiconductor — *triacul* — care îşi găseşte o utilizare deosebită în schemele de variatoare de tensiune alternativă. Triacul se caracterizează prin aceea că poate permite trecerea curentului în ambele sensuri, intrînd în conducţie la aplicarea unui impuls de comandă corespunzător. În acest mod, prin folosirea fiecărui triac se înlocuieşte un grup de două tiristoare montate în antiparalel.

C i c l o i n v e r t o r u l permite atît variaţia tensiunii alternative, cît şi a frecvenţei.

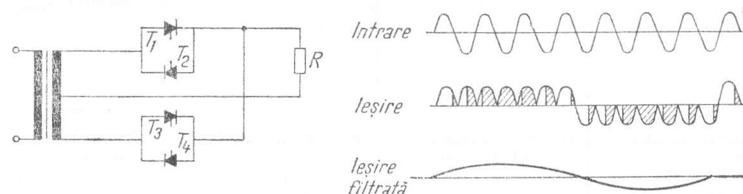


Fig. 8.92. Schema de principiu a unui cicloinvertor monofazat în schemă cu punct median.

În fig. 8.92 este reprezentată schema unui cicloinvertor monofazat în schemă cu punct median, avînd în fiecare ramură două tiristoare în antiparalel. Comandînd concomitent tiristoarele T_1 şi T_3 se obţine la ieşire o anumită polaritate a tensiunii, cealaltă polaritate obţinîndu-se pentru comanda concomitentă a lui T_2 şi T_4. Comandînd aprinderile celor două perechi de tiristoare cu o frecvenţă mai mică decît frecvenţa de intrare se obţine o frecvenţă a semnalului de ieşire variabilă teoretic între zero şi frecvenţa de intrare. Prin varierea momentelor aprinderii tiristoarelor în raport cu punctul natural de aprindere al tiristoarelor se variază valoarea efectivă a tensiuni de ieşire.

Prin filtrarea corespunzătoare a tensiunii de ieşire se obţine o formă de undă sinusoidală.

8.6. CONDENSATOARE

Tabelul 8.24. **Tipuri constructive de condensatoare**

Tipul constructiv	Dielectric	Folii	Observaţii
Condensatoare cu ulei	Hîrtie impregnată cu ulei.	Folii de aluminiu	În general pentru curent continuu şi curent alternativ În special la 50 Hz şi pentru tensiuni înalte şi puteri mari prin legare în serie şi în paralel Aplicaţii tehnice pînă la circa 4kHz; factor de pierderi: $18...45 \cdot 10^{-4}$. Condensatoare cu peliculă sintetică, $4...8 \cdot 10^{-4}$; înfăşurare cilindrică sau plată în recipiente ermetic închise, umplute cu substanţe de impregnare. Impregnarea şi umplerea recipientelor efectuată sub vid înaintat
Condensatoare cu clofen[1]	Hîrtie impregnată cu clofen	Folii de aluminiu	
Condensatoare cu peliculă sintetică	Peliculă sintetică şi hîrtie impregnată cu clofen	Folii de aluminiu	
Condensatoare cu hîrtie metalizată (MP)	Hîrtie impregnată cu ulei	Metal aplicat prin pulverizare sau vaporizare pe hîrtie metalizată)	
Condensatoare cu ulei de ricin	Hîrtie impregnată cu ulei de ricin	Folii de aluminiu	Pentru tensiuni şi curenţi de şoc
Condensatoare Styroflex	Folie extinsă de polistiren (Styroflex) cu sau fără substanţă lichidă de impregnare	Folii de aluminiu	Pentru frecvenţe medii şi înalte, preferabil 10 kHz pînă la puteri de cîteva mii de kvar; factor de pierderi: $1...6 \cdot 10^{-4}$ la 10^4Hz
Condensatoare ceramice	Substanţe ceramice speciale sub formă de plăci, cilindri, oale sau ţevi	Strat de argint ars	Pentru tensiuni înalte de curent continuu sau de curent alternativ pînă la frecvenţe foarte înalte, putere unitară pînă la 50 kvar, factor de pierderi $5...10 \cdot 10^{-4}$ la 10^6Hz

[1]) Clofenul este un lichid izolant inflamabil.

8.6.1. Calculul unui condesator pentru o putere cerută (fig. 8.93 şi 8.94)

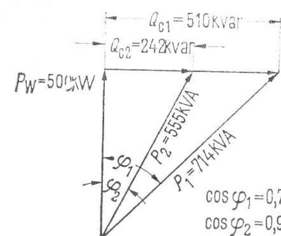


Fig. 8.93. Reducerea puterii aparente transportate

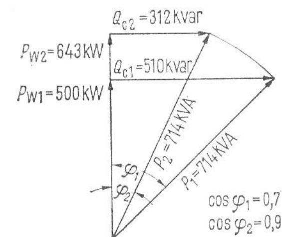


Fig. 8.94. Mărirea puterii active transportate

Condensator monofazat $Q_c = U^2 \omega C \cdot 10^{-3}$; $I_c = \dfrac{Q_c}{U}$

$$C = \frac{Q_c \cdot 10^3}{U^2 \omega}\ ;\ X_c = \frac{U}{I_c}.$$



În formulele de mai sus:

Q_c este puterea condensatorului, în kvar;
U — tensiunea condensatorului, în kV;
I_c — curentul condensatorului, în A;
C — capacitatea, în μF;
ω — pulsaţia ($\omega = 2\pi f$);
X_c — reactanţa, în Ω.

La 50 Hz: $Q_c = 0{,}314\ U^2 C$, iar $C = \dfrac{Q_c}{0{,}314\ U^2}$.

Condensatoarele trifazate au aceeaşi putere reactivă dacă

$$C = C_Y = 3\ C_\Delta.$$

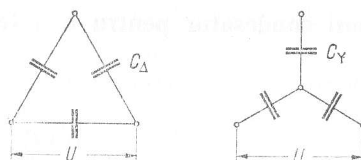
unde: C este capacitatea unui condensator monofazat corespunzător;
C_Y — capacitatea pe o fază în conexiune stea;
C_Δ — capacitatea pe o fază în conexiune triunghi.

Dacă U este tensiunea de linie, în kV, puterea totală a condensatoarelor pentru conexiune trifazată în stea sau în triunghi este

$$Q_c = U^2\ \omega\ C_Y \cdot 10^{-3};\ I_c = \frac{Q_c}{U_c\sqrt{3}}.$$

$$Q_c = 3\ U^2\ \omega\ C_\Delta \cdot 10^{-3};\ X_c = \frac{U}{I_c\sqrt{3}}.$$

[1]) V. STAS 7083-64 pentru condensatoare destinate îmbunătăţirii factorului de putere.



Tabelul 8.25 Aplicații principale

Destinație	Aplicații preferențiale
Condensator de putere pentru îmbunătățirea factorului de putere Determină compensarea puterii reactive, reducînd astfel sarcina reactivă a conductoarelor de legătură, a transformatoarelor, a liniilor de transport și în sfîrșit a generatoarelor; de asemenea servește la mărirea transportului de putere activă la putere aparentă constantă Stimulent pentru compensare la consumatori prin tarife; de asemenea pentru întreprinderi producătoare de energie, datorită creșterii randamentului și a puterii active transportate	1. Îndeosebi în rețele de joasă și medie tensiune. Compensare individuală, de grup sau centrală: a) acționări cu motoare electrice; b) consumatori de curenți mari ca: cuptoare electrice, mașini de sudat, instalații de medie frecvență; c) lămpi fluorescente. 2. În rețele de înaltă tensiune pentru compensarea puterii reactive a liniilor de transport, a transformatoarelor și în puncte de concentrare a puterii reactive
Condensatoare serie pentru compensarea liniilor de transport și a transformatoarelor	1. Pe linii de medie tensiune pentru menținerea tensiunii. 2. Pe linii de înaltă tensiune pentru mărirea stabilității și puterii naturale
Condensatoare pentru motoare	Pentru pornirea și funcționarea motoarelor de curent alternativ monofazat sau pentru conectarea motoarelor trifazate la o rețea monofazată
Condensatoare de aplatisare pentru reducerea vîrfurilor tensiunii redresate	În sisteme de curent continuu ca element de acumulare de energie sau ca element de filtrare
Condensator de protecție contra supratensiunilor, pentru protecția transformatoarelor și generatoarelor	În instalații de înaltă tensiune pentru aplatisarea frontului undelor de șoc
Condensatoare de cuplare	Pe linii de înaltă tensiune pentru telecomunicații prin curenți purtători de înaltă frecvență
Condensatoare de unde de șoc	Construcția generatoarelor de șoc
Condensatoare de curenți de șoc cu inductanță proprie redusă	Pentru producerea șocurilor de curent în cercetări asupra plasmei și pentru tehnologii speciale (de exemplu formare de metal — ca Hydrospark)

8.6.2. Exploatarea condensatoarelor de putere

Condensatoarele trebuie să fie montate pe cît posibil în apropierea instalațiilor consumatoare de putere reactivă pentru ca aceasta să se închidă pe circuite scurte.

Compensarea individuală se aplică atunci cînd există o cerere constantă de putere reactivă, de exemplu în cazul motoarelor mai mari, cu un număr mare de ore de funcționare.

În cazul cînd este vorba de un grup de consumatori de putere reactivă cu sarcini intermitente sau variabile, este avantajos să se efectueze compensarea cererii medii de putere reactivă în comun (compensare de grup).

În cazul compensării centrale, puterea reactivă a unei întregi instalații sau rețele este compensată cu ajutorul unei singure baterii de condensatoare. Bateria este astfel subîmpărțită încît să se adapteze la cererea de putere reactivă și se reglează automat, prin relee de putere reactivă (reglaj automat al condensatoarelor).

La punerea sub tensiune, în special atunci cînd se leagă în paralel condensatoare, la joasă tensiune este necesar să se folosească întreruptoare sigure, de preferință contactoare cu rupere în aer. La tensiuni înalte și puteri mai mari, sînt necesare bobine sau rezistențe pentru limitarea pantei curentului și a valorii maxime a acestuia. În cazul tensiunilor medii și înalte este adeseori avantajoasă instalarea condensatoarelor în exterior.

Condensatoarele au pierderi reduse; în cazul condensatoarelor cu clofen, de exemplu, acestea sînt 0,18...0,45 din puterea condensatoarelor. Totuși este recomandabilă montarea condensatoarelor într-o încăpere răcoroasă și bine ventilată, ceea ce mărește durata lor de viață.

Reducerea puterii aparente este încurajată de întreprinderile furnizoare de electricitate printr-un tarif diferențiat[1]). Tabelul 8.26 indică modul de determinare a puterii condensatoarelor necesare în acest scop.

Tabelul 8.26. Puterea condensatoarelor pentru un factor de putere dorit

Factor de putere dorit / Factor de putere existent	Puterea condensatoarelor, în kvar, la 1 kW putere activă pentru următorii factori de putere						
	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0,20	3,88	4,02	4,15	4,28	4,42	4,57	4,90
0,30	2,16	2,30	2,43	2,56	2,70	2,85	3,18
0,40	1,27	1,41	1,54	1,67	1,81	1,96	2,29
0,45	0,96	1,10	1,23	1,36	1,50	1,66	1,98
0,50	0,71	0,85	0,98	1,11	1,25	1,40	1,73
0,55	0,50	0,64	0,77	0,90	1,03	1,19	1,52
0,60	0,31	0,45	0,58	0,71	0,85	1,00	1,33
0,65	0,15	0,29	0,42	0,55	0,69	0,84	1,17
0,70	—	0,14	0,27	0,40	0,54	0,69	1,02
0,72	—	0,08	0,21	0,34	0,48	0,64	0,96
0,74	—	0,03	0,16	0,29	0,43	0,58	0,91
0,76	—	—	0,11	0,24	0,37	0,53	0,86
0,78	—	—	0,05	0,18	0,32	0,47	0,80

[1]) În R.S.R. problema compensării factorului de putere este reglementată de Regulamentul de utilizare a energiei electrice. Factorul de putere neutral (azi 0,93) conduce la plata energiei electrice la valoarea rezultată din tariful normal. Pentru cos $\varphi < 0,93$ se aplică penalizări. Pentru cos $\varphi > 0,93$ se acordă bonificații.

Tabelul 8.26 (continuare)

Factor de putere existent \ Factor de putere dorit	Puterea condensatoarelor, în kvar, la 1 kW putere activă pentru următorii factori de putere						
	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0,80	—	—	—	0,13	0,27	0,42	0,75
0,82	—	—	—	0,08	0,21	0,37	0,70
0,84	—	—	—	0,03	0,16	0,32	0,65
0,86	—	—	—	—	0,11	0,26	0,59
0,88	—	—	—	—	0,06	0,21	0,54
0,90	—	—	—	—	—	0,16	0,48
0,92	—	—	—	—	—	0,10	0,43
0,94	—	—	—	—	—	0,04	0,36

Exemplu:

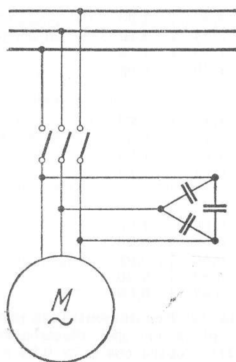
Factor de putere existent cos φ_1	0,76
Factor de putere dorit cos φ_2	0,90
Puterea condensatoarelor pentru 1 kW putere activă conform tabelului 8.26	0,37
Valoarea medie a puterii active din citirile contoarelor	140 kW

Putere necesară a condensatoarelor: 0,37 · 140 = 51,8 kvar,

Putere aleasă, 50 kvar.

Compensarea individuală a motoarelor asincrone trifazate. Condensatorul se leagă în general în paralel la bornele motorului; el se introduce și se scoate din circuit o dată cu motorul.

Pentru a se evita supracompensarea la sarcina parțială și autoexcitarea la reducerea vitezei, trebuie să se compenseze în general numai circa 90% din puterea reactivă la mers în gol a motorului. În consecință, la plină sarcină se obține în general un factor de putere de circa 0,90, iar la sarcină parțială și la mers în gol, de circa 0,95. Puterea reactivă de mers în gol Q_{C0} se poate calcula cunoscînd unghiul de defazaj φ_0, valoarea curentului absorbit la mers în gol I_0 și tensiunea U



$$Q_{C0} = \sqrt{3}\ UI_0 \sin \varphi_0 \cdot 10^{-3} \text{ kvar} \approx \sqrt{3}\ UI_0 \cdot 10^{-3} \text{ kvar}.$$

Diagrama din fig. 8.95 poate servi în mod orientativ pentru stabilirea puterii reactive la mers în gol. Curbele reprezintă valori medii ale unui mare număr de măsurări la motoare cu rotoare în colivie de veveriță.

Motoarele cu pornirea în stea-triunghi pot fi compensate astfel:

a) cu ajutorul unor condensatoare trifazate și comutatoare speciale stea-triunghi pentru motoare trifazate compensate;

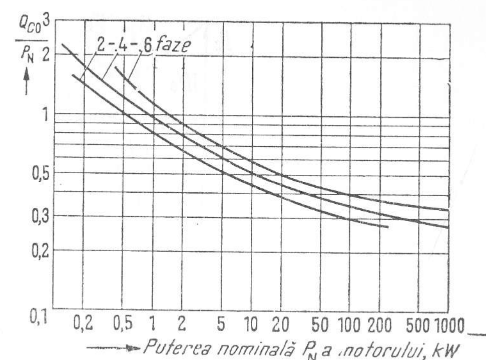


Fig. 8.95. Raportul dintre puterea reactivă Q_{C0} și puterea nominală a motorului P_N a motoare cu rotor în colivie de veveriță (valori medii)

b) prin conectarea a cîte unui singur condensator la fiecare din cele trei înfășurări ale motorului (de obicei cu condensatoare trifazate cu șase borne libere);

c) prin conectarea condensatorului cu ajutorul unui contactor în aer propriu.

Condensatoare alimentate prin transformatoare. Cînd sarcina este redusă, puterea capacitivă în aval de transformatoare trebuie să fie limitată pentru a împiedica apariția rezonanței la armonice superioare. În general, se manifestă mai puternic armonicele de ordinul 5 și 7; puterea admisibilă a condensatoarelor se determină de preferință pentru cazul rezonanței cu aceste frecvențe. În același timp, pentru condensatoare, creșterea tensiunii se limitează la 1,5%. În fig. 8.96 sînt indicate valori practice. Deoarece echipamentele de reglaj automat al condensatoarelor trebuie de asemenea să evite creșteri de tensiune și rezonanța pe armonice, regulatorul trebuie să se mențină în aceleași limite.

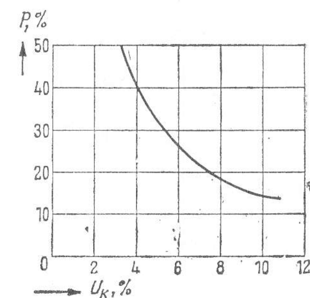


Fig. 8.96. Puterea admisibilă a condensatoarelor, în % din puterea transformatorului la sarcină redusă.

Condensatoarele legate în serie. Legarea în serie a condensatoarelor se utilizează în rețele de medie tensiune pentru stabilizarea tensiunii (fig. 8.97 și 8.98).

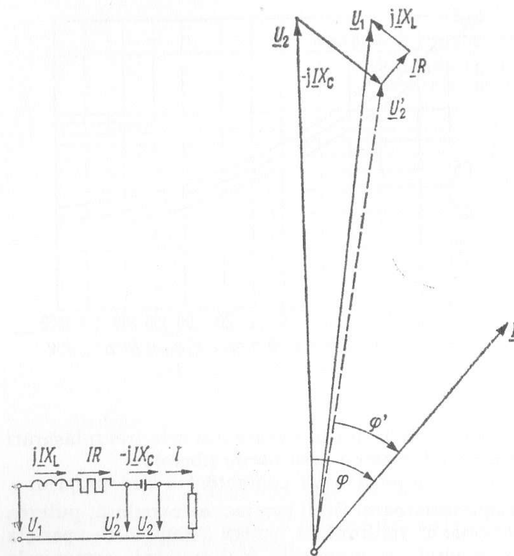


Fig. 8.97. Circuitul echivalent şi diagrama fazorială a unei linii de medie tensiune cu condensator serie.

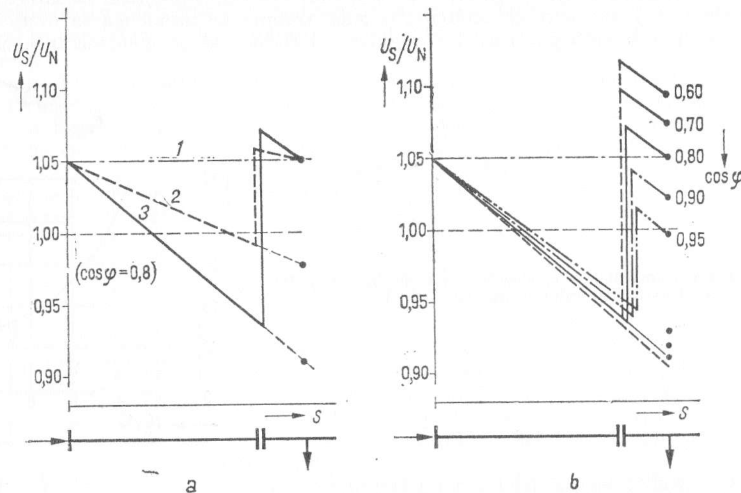


Fig. 8.98. Caracteristica tensiunii de-a lungul unei linii de medie tensiune cu condensatoare serie: *a* – în funcţie de sarcină; *b* – în funcţie de factorul de putere. *1* – mers în gol; *2* – jumătate din sarcină; *3* – plină sarcină.

Notaţii:

U_1 este tensiunea la începutul liniei, în V;
U_N – tensiunea nominală a liniei, în V;
U_2 – tensiunea la ieşirea din condensatorul serie, în V;
U_2' – tensiunea la intrarea în condensatorul serie, în V;
U_c – tensiunea nominală a bateriei de condensatoare pe fază, în V;
U_k – tensiunea de scăpări a transformatorului, în V;
U_S – tensiunea alternativă de funcţionare în curent alternativ, în V;
ΔU – creşterea dorită de tensiune în punctul de instalare, în V/fază;
I – curentul total maxim care trece prin condensatorul serie (curentul nominal al liniei şi deci al condensatorului serie), în A;
I_b – componenta reactivă a curentului din linie în punctul de instalare, în A;
I_w – componenta activă a curentului, în A;
X_L – reactanţa inductivă a liniei ce trebuie compensată, în Ω/fază;
X_c – reactanţa capacitivă a condensatorului serie, în Ω/fază;
R – rezistenţa liniei ce trebuie compensată, în Ω/fază;
φ – defazajul dintre curent şi tensiune în punctul instalării condensatorului serie;
Q_c – puterea nominală a întregii baterii de condensatoare (respectiv puterea condensatoarelor ce trebuie instalată), în kvar.

Formule aproximative de calcul. Reactanţa capacitivă a condensatorului, cînd la extremitatea liniei există sarcini şi tensiunea U_1

$$X_c = X_L + R\cos\varphi.$$

Reactanţa capacitivă a condensatorului în cazul sarcinii distribuite şi a creşterii de tensiune dorită în punctul de instalare a condensatorului

$$X_c = \frac{\Delta U}{I_b}.$$

Tensiunea nominală a condensatorului serie are expresia

$$U_c = X_c I.$$

Puterea nominală a întregii baterii de condensatoare adică pentru toate trei fazele luate împreună este

$$Q_c = X_c I^2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}.$$

Pentru linia reprezentată în fig. 8.99 şi condiţiile de sarcină date, condensatorul serie trebuie astfel dimensionat încît

$$U_c = U_1.$$

Variaţia de tensiune pînă în punctul de instalare, cu o circulaţie de putere de 2 MVA, care corespunde unui curent total de 115,5A ($I_w = 92{,}4$ A; $I_b = 69{,}3$ A, cu $\cos\varphi = 0{,}8$) şi cu

$$R = 3{,}57\ \Omega \text{ şi } X_L = 3{,}55\ \Omega,$$

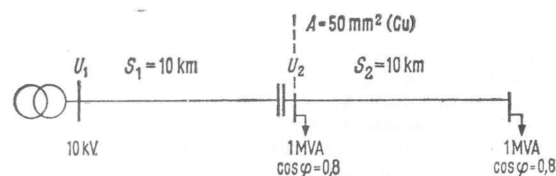


Fig. 8.99. Exemplu de linie.

este

$$\Delta U = RI_w + X_L I_b = 576 \text{ V/fază},$$

adică circa 10%. Variația de tensiune la extremitatea liniei este de circa 15%.

Reactanța capacitivă a condensatorului serie pentru condiția dată este

$$X_c = \frac{576}{69{,}3} \ \Omega\text{/fază} = 8{,}32 \ \Omega\text{/fază}.$$

Tensiunea nominală a condensatorului are valoarea

$$U_c = 115{,}5 \cdot 8{,}32 = 960 \text{ V}.$$

Puterea nominală a bateriei de condensatoare este

$$Q_c = 115{,}5^2 \cdot 8{,}32 \frac{3}{10^3} \text{ kvar} = 333 \text{ kvar}.$$

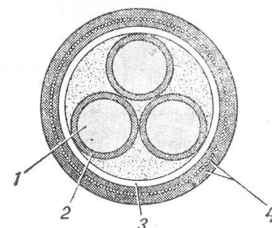
Ținînd seamă de creșterile de sarcină care ar putea apărea este practic să se instaleze o baterie de 450 kvar (150 kvar pe fază) această valoare fiind convenabilă și pentru elementele componente și corespunzătoare unui curent nominal de 134,3 A și unei tensiuni nominale de 1117 V. După instalarea condensatorului serie, la mijlocul liniei apare aceeași tensiune ca la începutul ei la $\cos\varphi = 0{,}8$, iar la capătul liniei apare o variație de tensiune de circa 5%.

Indicații de exploatare pentru compensarea în serie. Tensiunea la bornele condensatorului serie este funcție de curentul de trecere, adică ea poate crește pînă la valori inadmisibile la curenți mari (în special în cazul apariției unui scurtcircuit în aval de punctul de instalare). De aceea condensatorul se protejează printr-un descărcător în paralel, care funcționează imediat ce se atinge o tensiune anumită, descărcînd astfel condensatorul și comandînd introducerea așa-numitului întreruptor de șuntare prin intermediul releelor. Acest întreruptor servește și la punerea în funcțiune a instalației.

În cazul instalațiilor mai mari trebuie să se prevadă și o protecție împotriva defectelor interne, care comandă interuptorul de șuntare al întregului echipament atunci cînd apare o străpungere într-un element de condensator.

Din cauza unor fenomene care apar uneori în legătură cu instalarea condensatoarelor serie, de exemplu ferorezonanța (la anclanșarea în gol a transformatoarelor și uneori la apariția unor puneri la pămînt în rețelele prevăzute cu bobine de stingere) și autoexcitarea motoarelor asincrone, este necesară o proiectare atentă.

8.7. CABLURI DE FORȚĂ[1]



Tabelul 8.27. **Construcția cablurilor. Tip constructiv de bază pentru cabluri**

Materialul conductorului	Tipul conductorului		Izolația miezului conductor	Manta	Înveliș protector și armătură
Cupru	rotund	monofilar re	hîrtie impregnată	plumb	Peste mantaua de plumb: 1) compound, bandă de hîrtie, iută
		multifilar rm			2) compound, bandă de hîrtie, armare cu bandă sau sîrmă de oțel, iută
	sector	monofilar se			3) compound, manta din plastic
		multifilar sm			4) compound, bandă de hîrtie, armare cu bandă sau sîrmă de oțel, manta din plastic
Aluminiu	alte forme ale secțiunii conductorului	rm/v rotund, împletit, comprimat în timpul împletirii	cauciuc	aluminiu	Peste mantaua de aluminiu: 1) strat cu bandă din plastic în compound, manta din plastic

[1]) STAS 6007–59; 2405–61; 4481–66

Tabelul 8.27 (continuare)

Materialul conductorului	Tipul conductorului		Izolația miezului conductor	Manta	Înveliș protector și armătură
Aluminiu		rse/3f miezul conductor compus din trei conductoare sub formă de sector și acoperit cu un strat de sîrmă plată profilată	Cauciuc	Aluminiu	
	tubular	rm/v 12 h conductor de tip tubular, cu diametrul interior 12 mm, compus din unul sau mai multe straturi de sîrme rotunde sau profilate (de asemenea cu bandă răsucită de întărire)	plastic	cauciuc	Peste mantaua de cauciuc sau din plastic: 1) fără armătură, fără înveliș de protecție
				plastic	2) armătură din sîrmă de oțel rotundă sau plată sub manta exterioară

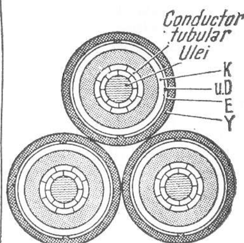
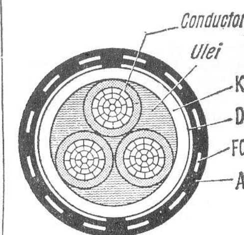
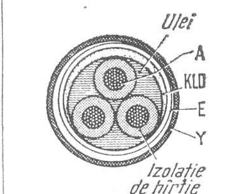
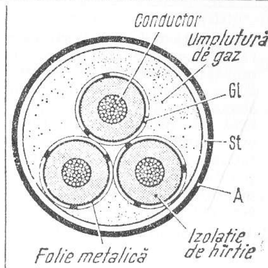
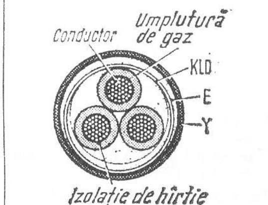
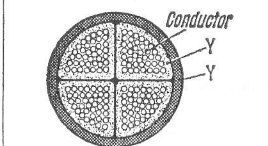
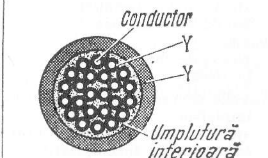
În afară de tipurile constructive de cabluri din tabelul de mai sus, există variante în care numărul conductoarelor principale, secțiunea, dispoziția mantalelor și învelișurilor, diferă. În plus, se execută cabluri speciale pentru utilizare în montaj suspendat (legînd puncte între care există mari diferențe de înălțime), cabluri de întindere, cabluri pentru montaj în puțuri, cabluri pentru mine, cabluri pentru montaj aerian, cabluri pentru montaj submarin (care pot rezista la solicitări de tracțiune) cabluri pentru nave, cabluri de medie frecvență etc.

Tabelul 8.28. Exemple de tipuri constructive de cabluri uzuale [1])

Cabluri cu izolație de hîrtie		
Cablu în manta *Cablu în manta de plumb cu isolație de hîrtie* Izolația mantalei și a conductoarelor principale: hîrtie impregnată Manta de plumb Înveliș de protecție Armare Înveliș de protecție	Cablu trifazat cu patru conductoare NKBA 4 × 50 Sm 0,6/1 kV: (CHPBI) N — cablu conform normelor VDE conductoare de cupru (C) K — manta de plumb (P) B — armare cu bandă de oțel (B) A — înveliș exterior din compound — și iută (I) sm — conductoare în formă de sector, împletite (z)	K B A Umplutură Înveliș protector
Cablu cu manta de aluminiu Izolația conductoarelor principale și a mantalei: hîrtie impregnată Manta de aluminiu Înveliș de protecție: bandă din material plastic în compound manta din material plastic Mantaua de aluminiu are rolul de conductor de nul legat la pămînt	Cablu trifazat, cu trei conductoare NAKLEY 3 × 95 sm 0,6/1 kV (ACYABY) [2]) N — cablu conform normelor VDE (C) A — conductoare de aluminiu (A înaintea simbolului) KL — manta de aluminiu (—) E — bandă din material plastic (—) Y — manta din material plastic (Y) sm conductoare în formă de sector, împletite (z)	Conductor KL E Y Umplutură
Cablu cu cîmp radial *Cablu ecranat* Izolația conductoarelor: Hîrtie impregnată cu înveliș de hîrtie metalizată (cablu „tip H") Manta metalică Înveliș de protecție Armătură Înveliș de protecție	Cablu trifazat, cu trei conductoare NHKFA 3 × 70 sm 8,7/15 kV: N — cablu conform normelor VDE (C) conductoare de cupru (C înaintea simbolului) H — hîrtie metalizată („folie H") (—) K — manta de plumb (P) F — armătură din sîrmă plată de oțel A — înveliș exterior din compound și iută (I) sm — conductoare în formă de sector, împletite (z)	Conductor H K F A Umplutură Înveliș protector
Cablu SL Izolația conductoarelor principale: hîrtie impregnată hîrtie metalizată Manta metalică peste fiecare parte conductoare Înveliș de protecție peste fiecare manta Armătură comună Înveliș de protecție	Cablu trifazat, cu trei conductoare NAEKBA 3 × 120 rm; 17,3/30 kV; N — cablu conform normelor VDE (C) A — conductoare de aluminiu (A înaintea simbolului) E — fiecare conductor principal înconjurat de o manta metalică și strat de protecție împotriva coroziunii, apoi împletite (—) K — manta de plumb (P) B — armătură din bandă de oțel (B) A — înveliș exterior din compound și iută (I) rm —conductoare rotunde, împletite	Conductor EK B A Înveliș protector Umplutură

[1]) STAS 2405-61, 4481-66; în paranteză se indică prevederile STAS.
[2]) Cablu care se execută la cererea beneficiarului.

Tabelul 8.28 (continuare)

Cabluri umplute cu ulei şi cu gaz		
Cabluri monofilare umplute cu ulei de joasă presiune		
Conductor tubular Izolaţia conductorului principal: hîrtie impregnată hîrtie metalizată Manta de plumb Împletitură rezistentă la presiune Înveliş de protecţie Circulaţie de ulei în interiorul conductorului tubular	Cablu monofilar pentru sisteme trifazate NÖKuDEY 1 × 185 rn/v 12 h 64/110 kV: N – cablu conform normelor VDE(C) Ö – cablu umplut cu ulei, conductor de cupru (–) K – manta de plumb (P) uD – împletitură de protecţie nemagnetică împotriva presiunii (–) E – bandă din material plastic în compound (–) Y – înveliş exterior din material plastic (Y) rm/v 12 h – conductor tubular rotund, sîrme profilate, diametru interior 12 mm	
Cablu trifazat cu ulei Uleiul circulă în spaţiile dintre părţile conductoare şi manta Izolaţia conductoarelor principale: hîrtie impregnată hîrtie metalizată *Manta de metal* a) Manta comună de plumb Împletitură rezistentă la presiune: Bandă de material plastic în compound Armătură Înveliş de protecţie sau: b) Manta din aluminiu cu nervuri Bandă de material plastic în compound Manta de material plastic	Cablu trifazat cu trei conductoare: NÖKDEFOA 3×120 rm/v 17,3/30 kV: N – cablu conform normelor VDE (C) Ö – cablu umplut cu ulei, conductoare de cupru K – manta de plumb (P) D – împletitură rezistentă la presiuni E – bandă de material plastic în compound FO – armătură de sîrmă de oţel plat deschisă, învelind parţial cablul (–) A – înveliş exterior din compound şi iută (–) rm/v – conductoare rotunde comprimate	
	NÖAKLDEY 3 × 120 rm 17,3/30 kV N – cablu conform normelor VDE(C) Ö – cablu umplut cu ulei (–) A – conductoare de aluminiu (A) KLD – manta din aluminiu cu nervuri(–) E – bandă de material plastic în compound (–) Y – manta de material plastic (Y)	
Cablu cu presiune internă de gaz cu ţeavă de oţel		
Izolaţia conductoarelor principale: hîrtie impregnată hîrtie metalizată Folie metalică şi hîrtie carbon peste fiecare conductor principal	Cablu trifazat cu trei conductoare Gi Gl StA 3 × 150 rm/v 64/110 kV: Gi – cablu cu presiune internă de gaz conductoare de cupru	
Sîrme de ghidare peste fiecare conductor principal Trei conductoare principale trase în ţeavă de presiune (oţel) Ţeava este umplută cu gaz inert la mare presiune	Gl – sîrme de ghidare peste fiecare conductor principal St – ţeavă de oţel A – protecţie contra coroziunii ţevii de oţel, constînd dintr-un înveliş din fibră de sticlă impregnat rm/v – conductor rotund, comprimat	
Cablu cu presiune internă de gaz cu manta metalică Izolaţia conductoarelor principale: hîrtie impregnată hîrtie metalizată Folie metalică şi hîrtie carbon peste fiecare conductor principal Manta din aluminiu cu nervuri Protecţia contra coroziunii: bandă din material plastic în compound; manta din material plastic Cablul este sub presiune de gaz	Cablu trifazat cu trei conductoare Gi KLDEY 3 × 150 rm/v 34,7/60 kV: Gi – cablu cu presiune internă de gaz conductoare de cupru KLD – manta din aluminiu cu nervuri E – bandă din material plastic în compound Y – manta din material plastic (Y) rm/v – conductor rotund comprimat	
Cabluri cu izolaţie din material plastic		
Cablul cu izolaţie din material plastic Izolaţia părţilor conductoare Material plastic, de obicei policlorură de vinil (PVC) Înveliş comun al conductoarelor principale: amestec de material plastic şi cauciuc sau material termoplastic (sau înveliş din bandă) Manta din material plastic (PVC) indicat în mod special pentru folosire în montaje interioare, unde nu este necesară o pregătire a capetelor terminale	Cablu trifazat cu patru conductoare principale NYY 4 × 150 sm 0,6/1 kV: (CYY) N – cablu conform normelor VDE(C) Y – izolaţie din material plastic (Y) Y – manta din material plastic (Y) sm – conductoare în formă de sector, împletite	
	Cablu de comandă multifilar NYY 24 × 2,5 re 0,6/1 kV: (CSYY) N – cablu conform normelor VDE (C) conductoare de cupru Y – izolaţie din material plastic (Y) Y – manta din material plastic (Y) re – conductoare rotunde monofilare; firele identificate prin cifre imprimate pe ele	

Tabelul 8.28 (continuare)

Al patrulea conductor (conductorul de nul poate fi şi el montat concentric sub manta. El se compune în acest caz din sîrme rotunde de cupru montate ca întăritură împreună cu împletitură de contact („Cablu Ceander"). Acest lucru permite montarea manşoanelor de înnădire fără secţionarea conductorului concentric. Cablu de distribuţie locală	Cablu trifazat cu $3^1/_2$ conductoare principale NYCWY 3 × 185 sm/95 0,6/1 kV: N — cablu conform normelor VDE (C) conductoare de cupru Y — izolaţie din material plastic (Y) CW — conductor concentric din sîrme de cupru montate ca întăritură („Cablu Ceander") cu împletitură de contact Y — manta din material plastic (Y) sm — conductoare în formă de sector, împletite 95 — secţiunea conductorului concentric

Cablu de medie tensiune cu izolaţie din material plastic şi ecranat

Izolaţia conductoarelor principale: material plastic din policlorură de vinil (PVC) Înveliş comun al conductoarelor principale: amestec de cauciuc sintetic sau material termoplastic sau înfăşurare din bandă Ecran metalic Manta din material plastic (PVC)	Cablu trifazat cu trei conductoare principale NYFGbY 3 × 70 sm/6 3,5/6 kV: N — cablu conform normelor VDE (C) conductoare de cupru Y — izolaţie din material plastic (Y) F — ecran din sîrmă plată de oţel galvanizat (E) Gb — împletitură din bandă de oţel (—) Y — manta din material plastic (Y) sm — conductoare în formă de sector, împletite 6 — secţiunea ecranului corespunde la 6 mm² cupru

Cablu cu izolaţie din material plastic cu conductoare principale ecranate individual

Conductoare principale: strat conductor de izolaţie din material plastic, policlorură de vinil (PVC) strat de lac conductor bandă conductoare Ecran: bandă de cupru(secţiune 2 mm² pe fiecare conductor principal) Înveliş comun al conductoarelor împletite: amestec de cauciuc sintetic sau material termoplastic Manta din material plastic	NYCEY 3 × 95 rm/3 × 2 5,8/10 kV: N — cablu conform normelor VDE (C) conductoare de cupru Y — izolaţie din material plastic (Y) CE — ecran de cupru pe fiecare conductor principal (—) Y — manta din material plastic (Y) rm — conductoare rotunde, împletite 3 × 2 — secţiunea ecranului 2 mm² pe fiecare conductor principal.

Încărcările pentru cabluri cu izolaţie din material plastic şi din hîrtie montate în pămînt. Valorile recomandate pentru curentul admisibil al cablurilor sînt în curs de pregătire pe baza metodelor internaţional valabile pentru calcul şi pentru constantele de linie. Pînă la publicarea acestor valori, valorile pentru încărcări indicate în tabele sînt aplicabile în următoarele condiţii tip (în afară de cazul cînd se precizează anumite excepţii):

— pentru un singur cablu în pămînt, cu condiţia ca evacuarea căldurii să nu fie împiedicată de uscarea pămîntului;

— temperatura ambiantă 20°C;

— rezistivitatea termică a izolaţiei de hîrtie şi a învelişurilor de protecţie de hîrtie şi iută în compound 550 grd cm/W;

— rezistivitatea termică a izolaţiei de PVC 650 grd cm/W;

— rezistivitatea termică a pămîntului 70 grd cm/W;

— adîncimea şanţului de montare 70 cm; cărămizi de protecţie într-un singur strat.

În cazul cînd condiţiile locale diferă de cele indicate mai sus, valorile încărcărilor trebuie să fie modificate în conformitate cu tabelele 8.35 . . . 8.40.

Tabelul 8.29. **Temperatura conductorului şi creşterea temperaturii**

Izolaţie	Tensiunea nominală U_0/U kV	Valori maxime admisibile: Temperatura conductorului °C	Creşterea temperaturii conductorului la temperatura ambiantă de 20 °C grd
Hîrtie impregnată	0,6/1...3,5/6	65	45
	5,8/10...11,6/20	55	35
	17,3/30...34,7/60	45	25
PVC	0,6/1...3,5/6	70	50
	5,8/10	60	40

Tabelele de încărcare se bazează pe temperaturile conductoarelor şi creşterile de temperatură datorate curentului indicate în tabelul 8.29.

Dacă se notează cu θ_{un} creşterea de temperatură a conductoarelor folosite ca bază pentru tabelele de încărcări, iar curentul nominal conform acestor tabele cu I_N, se obţine pentru un curent I diferit de I_N, pentru aceeaşi rezistenţă a conductorului, următoarea expresie a creşterii de temperatură a conductorului θ_u care apare în noua situaţie:

$$\theta_u = \theta_{un}(I/I_N)^2.$$

Tabelul 8.30. Cabluri în manta cu unul şi mai multe conductoare de 0,6/1 kV, cu izolaţie din material plastic şi izolaţie de hîrtie[1])

Secţiunea nominală a conductorului mm²	Cabluri cu un conductor ²)		Cabluri cu două conductoare		Cabluri cu trei-patru conductoare	
	Încărcarea, în A					
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
1,5	35	—	30	—	25	—
2,5	50	—	40	—	35	—
4	65	50	50	40	45	35
6	85	70	65	50	60	45
10	110	90	90	70	80	65
16	155	125	120	95	110	90
25	200	160	155	125	135	110
35	250	200	185	150	165	130
50	310	250	235	190	200	160
70	380	305	280	225	245	195
95	460	370	335	270	295	235
120	535	430	380	305	340	270
150	610	490	435	350	390	310
185	685	550	490	390	455	355
240	800	640	570	455	515	410
300	910	730	640	510	590	470
400	1080	865	760	610	700	560
500	1230	985	—	—	—	—

¹) Valorile prevăzute prin normele româneşti sînt cu 10–15% mai mici (v. lucrarea „Conducte electrice" de C. Cruceru ş.a.).

²) Aceste valori sînt aplicabile în cazul unui singur cablu în reţelele de curent continuu şi pentru **un singur cablu fără manta metalică şi fără armare în curent alternativ şi reţele trifazate. Cablurile cu împletitură de sîrmă de oţel sau cupru se vor considera armate.**

Tabelul 8.31. Cabluri în manta cu izolaţie de hîrtie şi cabluri cu izolaţie din material plastic de 3,5/6 şi 5,8/10 kV

Secţiunea nominală a conductorului mm²	3,5/6kV		5,8/10 kV	
	Încărcarea, în A			
	Cu	Al	Cu	Al
6	55	45	—	—
10	75	60	65	50
16	100	80	85	70
25	130	105	110	90
35	160	130	135	110
50	195	155	165	130
70	235	190	200	160
95	280	225	240	190
120	325	260	280	225
150	370	295	320	255
185	420	335	360	290
240	490	390	420	340
300	560	445	475	385

Tabelul 8.32. Cabluri SL cu izolaţie de hîrtie şi cabluri ecranate cu trei conductoare principale de 3,5/6—34,7/60 kV

Secţiunea nominală a conductorului mm²	3,5/6 kV		5,8/10 ûV		8,7/15 kV		11,6/20 kV		17,3/30 kV		34,7/60 kV	
	Încărcarea, în A											
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
6	60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	80	65	70	55	—	—	—	—	—	—	—	—
16	110	85	95	75	90	70	—	—	—	—	—	—
25	145	115	125	100	120	95	115	90	—	—	—	—
35	180	145	150	120	145	115	140	110	135	105	—	—
50	220	175	190	150	180	145	170	135	165	130	—	—
70	265	210	230	185	220	175	210	170	200	160	—	—
95	310	250	270	215	255	205	245	195	235	185	210	170
120	365	290	310	250	295	240	285	230	270	215	240	190
150	415	330	350	280	340	270	325	260	310	250	270	215
185	465	370	395	315	380	305	365	290	345	275	305	245
240	535	430	460	370	445	355	425	340	400	320	355	280
300	610	490	520	415	500	400	480	385	450	360	400	320
400 ¹)	700	560	600	480	575	460	550	440	515	415	460	370
400 ²)	665	530	570	455	545	435	525	420	490	395	435	350
500 ¹)	780	625	670	540	640	510	615	490	580	465	—	—
500 ²)	740	595	635	515	610	485	585	465	550	440	—	—

Notă. Cablurile ecranate cu trei conductoare cu manta comună metalică pe conductoarele împletite se pot încărca cu 95% din valorile indicate pentru curenţi. Pînă la secţiuni de 300 mm² valorile din tabel se aplică la cabluri cu manta de plumb sau aluminiu.

¹) Valorile sînt aplicabile în cazul cablurilor cu manta de plumb.

²) Valorile sînt aplicabile în cazul cablurilor cu manta de aluminiu.

Tabelul 8.33. Cabluri cu izolaţie de hîrtie, cu un singur conductor cu manta de plumb, pentru 0,6/1 pînă la 17,3/30 kV şi cabluri cu izolaţia din material plastic pentru 0,6/1 pînă la 5,8/10 kV (trei cabluri separate alăturate, nearmate, în reţele trifazate)

Secţiunea nominală a conductorului mm²	0,6/1 kV		3,5/6 kV		5,8/10 kV		8,7/15 kV		11,6/20 kV		17,3/30 kV		34,7/60kV	
	Încărcarea, în A													
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
16	140	115	130	105	110	90	105	85	—	—	—	—	—	—
25	180	145	170	135	145	115	140	110	135	105	—	—	—	—
35	220	175	210	165	175	140	170	135	165	130	155	125	—	—
50	270	215	260	205	220	175	215	170	205	160	190	155	—	—
70	325	260	310	250	265	215	260	205	250	200	235	190	—	—
95	390	310	375	300	315	255	305	245	295	235	280	225	250	200
120	445	355	430	345	360	290	350	280	340	270	320	255	285	230
150	500	400	485	390	410	330	400	320	390	310	365	290	325	260
185	550	440	535	430	460	365	445	355	430	345	405	325	365	295
240	625	500	615	490	520	415	505	405	490	390	465	370	420	335
300	695	555	680	545	570	455	555	445	540	430	515	410	465	370
400	785	630	770	620	645	515	630	505	615	490	590	470	535	430
500	855	685	845	675	705	565	690	555	675	540	650	520	—	—

Notă: Aeeste valori sînt aplicabile pentru cabluri nearmate pozate unul lîngă altul cu un spaţiu liber de circa 7 cm (grosimea unei cărămizi) între ele, pentru a se ţine seamă de pierderile prin încălzire în mantaua de plumb atunci cînd mantaua este scurtcircuitată la ambele capete ale cablului fără rezistenţă.

Tabelul 8.34. **Cabluri cu izolaţie de hîrtie, cu un singur conductor, cu manta de aluminiu pentru 0,6/1 pînă la 17,3/30 kV (trei cabluri separate, alăturate, nearmate, în reţele trifazate [1])**

Secţiunea nominală a conductorului	0,6/1 kV		3,5/6 kV		5,8/10 kV		8,7/15 kV		11,6/20 kV		17,3/30 kV	
	Încărcarea, A											
mm²	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
16	140	115	130	105	110	90	105	85	—	—	—	—
25	180	145	170	135	145	115	140	110	135	105	—	—
35	220	175	210	165	175	140	170	135	165	130	155	125
50	270	215	260	205	220	175	215	170	205	160	190	155
70	310	250	295	240	250	205	245	195	240	190	225	180
95	370	295	355	285	300	240	290	235	280	225	265	215
120	425	340	410	330	340	275	335	265	325	255	305	240
150	475	380	460	370	390	315	380	305	370	295	345	275
185	495	395	480	390	415	330	400	320	390	310	365	295
240	565	450	555	440	470	375	455	365	440	350	420	335
300	590	475	580	465	485	390	500	400	485	390	465	370

[1]) V. nota de la tabelul 8.33.

Tabelul 8.35. **Cabluri la diferite temperaturi ambiante**

Tensiunea nominală U kV	Încărcarea în procente din valorile din tabelele 8.30...8.34 la următoarele temperaturi ambiante, °C									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	Izolaţie de hîrtie									
0,6/1 3,5/6	115	110	105	100	94	88	82	75	67	58
5,8/10 11,6/20	120	113	107	100	93	85	76	65	54	38
17,3/30 34,7/60	126	118	110	100	90	78	63	45	—	—
	Izolaţie din material plastic									
0,6/1 3,5/6	114	109	105	100	95	90	84	77	71	63
5,8/10	117	112	106	100	94	87	79	71	61	50

Tabelul 8.36. **Cabluri montate în aer liber**

Tensiunea nominală U kV	Încărcarea în procente din valorile din tabelele 8.30...8.34		
	1 cablu	3 cabluri alăturate	6 cabluri alăturate
		Distanţa dintre cabluri = = diametrul cablului	
0,6/1 ... 3,5/6	85	80	
5,8/10...11,6/20	90	85	80
17,3/30...34,7/60	95	90	75
		Cabluri în atingere	
0,6/1 ... 3,5/6	—	70	65
5,8/10...11,6/20	—	75	70
17,3/30...34,7/60	—	80	75

Tabelul 8.37. **Montarea comună în pămînt a unui număr de cabluri de curent continuu monofilare şi a unor cabluri multifilare**

Numărul de cabluri într-un şanţ[1])	2	3	4	5	6	8	10
Încărcarea în procente din valorile din tabelele 8.30...8.32	90	80	75	70	65	62	60

[1]) Interval liber între cabluri minimum 7 cm (grosimea unei cărămizi).

Tabelul 8.38. **Montarea comună în pămînt a unui număr de cabluri monofilare în reţele trifazate**

Numărul de cabluri într-un şanţ [1])	2	3	4
Încărcarea în procente din valorile din...... tabelele 8.33 şi 8.34	80	75	70

[1]) Interval liber între cabluri minimum 7 cm (grosimea unei cărămizi).

Tabelul 8.39. **Cabluri cu acoperire de protecţie**

Nisip compact şi acoperire cu cărămizi	Acoperire cu olane de zid, golul umplut cu lut	Acoperire de jur-împrejur cu cărămizi, golul umplut cu nisip	Jgheab acoperit, golul umplut cu lut	Acoperire cu olane de zid, golul umplut cu nisip	Jgheab acoperit, golul umplut cu aer
Încărcarea în procente din valorile din tabelele 8.30...8.34					
100	93	91	89	84	83

Tabelul 8.40. **Cabluri cu mai multe conductoare montate în tuburi de oţel sau lut ars şi în canale de tuburi prefabricate din cărămidă**

Numărul de ţevi conţinînd fiecare cîte un cablu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Încărcarea în procente din valorile din tabelele 8.30...8.34	82	74	70	67	65	63	62	60	59	58

Diferite rezistenţe ale solului. În cazul cînd rezistivitatea termică a solului diferă de valoarea de 70 grd cm/W pe care se bazează tabelele de încărcare, sarcina admisibilă se poate determina din fig. 8.100.

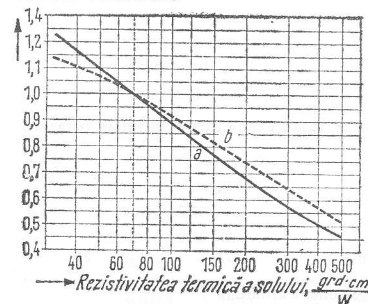


Fig. 8.100. Coeficienţi de reducere pentru diferite rezistenţe termice ale solului (valori medii): *a* — tensiune nominală 0,6/1...5,8/10 kV; *b* — tensiune nominală 8,7/15...17,3/30 kV.

Tabelul 8.41. **Rezistivitatea termică a diverselor tipuri de soluri**

Tipul solului	Rezistivitatea termică grd · cm/W	Coeficientul de reducere 0,6/1 ... 5,8/10 kV	Coeficientul de reducere 8,7/15 ... 17,3/30kV
Umplutură de zgură, uscată	550	0,43	0,50
Nisip normal 0% umiditate	310	0,57	0,63
10% umiditate	105	0,87	0,90
20% umiditate	75	0,98	0,98
saturat de umezeală	55	1,07	1,05
Pămînt nisipos, uscat	95	0,90	0,93
8% umiditate	60	1,05	1,03
lut sau pămînt argilos	65	1,03	1,02
Pămînt umed sau umplutură de nisip expusă ploii	40	1,17	1,11
Rocă densă (granit, bazalt etc.)	35	1,22	1,13
Rocă poroasă (gresie, calcar moale)	60	1,05	1,03

La determinarea rezistivităţii termice trebuie avut în vedere că patul cablului se poate usca cu timpul datorită pierderilor de căldură din cabluri. De acest lucru trebuie să se ţină seamă în mod special atunci cînd se pozează împreună un număr mare de cabluri supuse la sarcini de durată (de exemplu cabluri pentru întreprinderi chimice).

Cablurile montate în apă. Pentru aceste condiţii de montare este permisă o încărcare de 115% faţă de cea a cablurilor montate în pămînt, cu condiţia ca secţiunea conductorului principal să fie majorată în mod corespunzător atunci cînd cablurile trec din apă în pămînt sau în aer.

Creşterea temperaturii aerului în canalul de cabluri. În fig. 8.101 este reprezentată variaţia temperaturii aerului din canalul de cabluri în funcţie de pierderea totală de energie pe metru de canal de cabluri, pentru canale de diverse dimensiuni.

Rezistenţa conductorului şi căderea de tensiune. Pentru rezistenţa R, în Ω/km, a unui conductor se aplică următoarea formulă:

— rezistenţa în curent continuu la 20°C;

$$R_{20} = \frac{1\,000}{\chi_{20}\, q},$$

unde: χ_{20} este conductivitatea la 20°C; pentru cupru 56 m/Ωmm²; pentru aluminiu 33 m/Ω mm²;

q — secţiunea conductorului, în mm²;

— rezistenţa în curent continuu la temperatura de lucru (v. p. 230)

$$R_{\vartheta} = R_{20}\,[1 + \alpha_{20}\,(\vartheta - 20)]$$

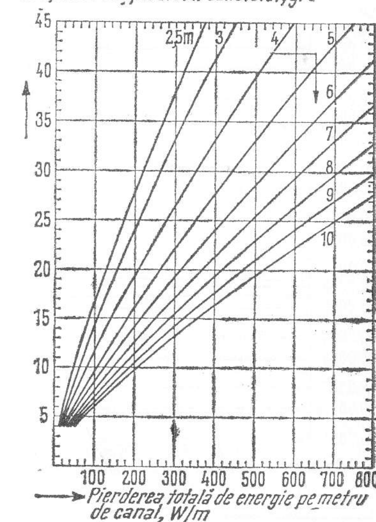


Fig. 8.101. Temperatura canalelor de cabluri la diferite dimensiuni.

unde α_{20} este coeficientul de temperatură al rezistenţei electrice: pentru cupru 0,00393 grd^{-1}; pentru aluminiu 0,00403 grd^{-1}.

Rezistenţa efectivă la temperatura de lucru ϑ are expresia

$$R_{w\vartheta} = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\vartheta - 20)] + \Delta R.$$

Rezistenţa suplimentară ΔR, în Ω/km, ţine seamă de pierderile suplimentare din cablu atunci cînd acestea lucrează în reţele de curent alternativ monofazat şi în reţele trifazate. În fig. 8.102 sînt reprezentate rezistenţele suplimentare ale cablurilor cu mai multe conductoare de diferite tipuri constructive.

Determinarea căderii de tensiune în următoarele cazuri:

a) curent continuu: $\Delta U = 2\ I\ R\ l$;
b) curent alternativ monofazat[1]): $\Delta U = 2\ I\ l\ (R_{w\vartheta} \cos\varphi + X \sin\varphi)$;
c) curent trifazat[1]): $\Delta U = \sqrt{3}\ I\ l\ (R_{w\vartheta} \cos\varphi + X \sin\varphi)$;
d) pierderea de putere: $\Delta P = 3\ I^2\ R_{w\vartheta}\ l \cdot 10^{-3}$,

unde: I este curentul, în A;
R — rezistenţa în curent continuu, în Ω/km;
R_{ϑ} — rezistenţa efectivă, în Ω/km;
X — reactanţa inductivă, în Ω/km;
l — lungimea cablului, în km.

Pentru calcule aproximative, căderea de tensiune ΔU, în V, pentru tensiuni de funcţionare de la 125 la 3 000 V se poate obţine din fig. 8.105, iar pierderea de putere ΔP, în kW, la tensiuni de funcţionare cuprinse între 6 şi 380 kV, din fig. 8.106.

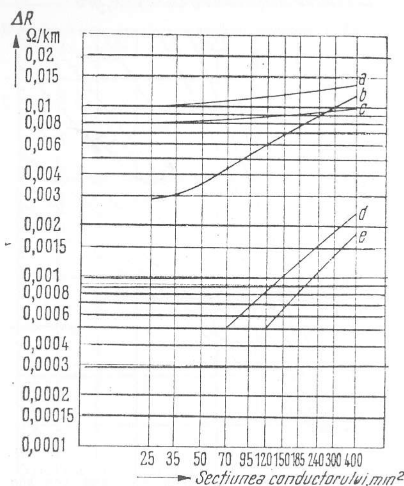


Fig. 8.102. Rezistenţa suplimentară ΔR a cablurilor cu mai multe conductoare, la $f = 50$ Hz: *a* — cabluri armate cu manta de plumb şi conductoare de cupru sau aluminiu; *b* — cabluri nearmate cu manta de aluminiu şi conductoare de cupru sau aluminiu; *c* — cabluri armate cu izolaţie din material plastic, cu conductoare de cupru sau aluminiu; *d* — cabluri nearmate cu izolaţie din material plastic, cu conductoare de cupru; *e* — cabluri nearmate, cu izolaţie din material plastic, cu conductoare din aluminiu.

[1]) Pentru curent defazat în urmă (sarcină inductivă). Pentru curent defazat înainte componenta reactivă devine negativă

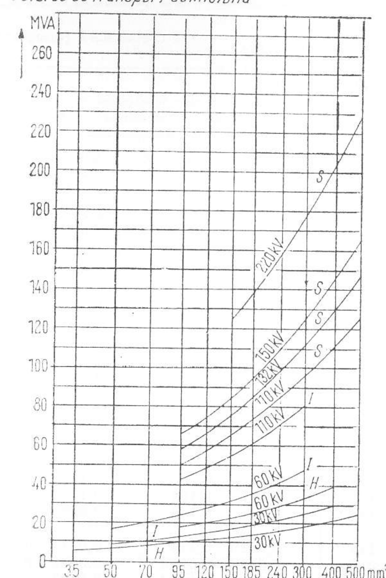


Fig. 8.103. Valori normalizate pentru puterea transportată prin cabluri de înaltă tensiune cu conductoare de aluminiu pozate în pămînt: *S* — cablu cu un singur conductor cu ulei, nearmat; *I* — cablu trifazat cu ulei; *H* — cablu *SL* impregnat cu compound.

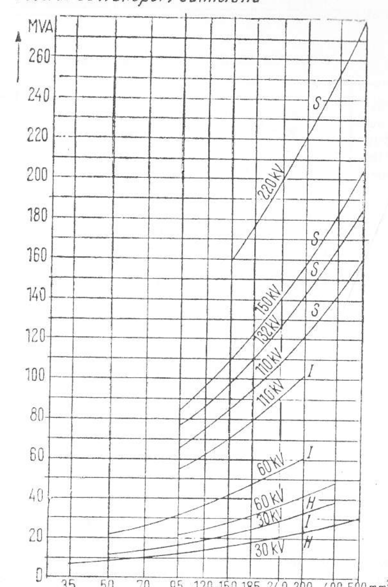


Fig. 8.104. Valori normalizate pentru puterea transportată prin cabluri de înaltă tensiune cu conductoare de cupru pozate în pămînt:
S — cablu cu un singur conductor cu ulei, nearmat; *I* — cablu trifazat cu ulei; *H* — cablu *SL* impregnat cu compound.

Tabelul 8.42. **Rezistenţa în curent continuu a conductoarelor de cupru şi aluminiu, în Ω/km în funcţie de temperatura conductorului [1])**

Secţiunea conductorului mm²	Temperatura conductorului											
	20 °C		25 °C		30 °C		35 °C		40 °C		45 °C	
	Cu [2])	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
1,5	11,9	—	12,1	—	12,4	—	12,6	—	12,8	—	13,0	—
2,5	7,14	12,1	7,28	12,3	7,42	12,6	7,56	12,8	7,7	13,0	7,84	13,3
4	4,46	7,58	4,55	7,73	4,63	7,88	4,72	8,04	4,81	8,19	4,9	8,34
6	2,98	5,05	3,03	5,15	3,09	5,25	3,15	5,35	3,21	5,45	3,27	5,56
10	1,79	3,03	1,82	3,09	1,86	3,15	1,89	3,21	1,92	3,27	1,96	3,33
16	1,12	1,89	1,14	1,93	1,16	1,97	1,18	2	1,2	2,04	1,22	2,08
25	0,714	1,21	0,728	1,23	0,742	1,26	0,756	1,28	0,77	1,31	0,784	1,33
35	0,510	0,866	0,52	0,883	0,530	0,9	0,54	0,918	0,55	0,935	0,56	0,95
50	0,357	0,606	0,364	0,618	0,371	0,63	0,378	0,642	0,385	0,654	0,392	0,667
70	0,255	0,433	0,26	0,442	0,265	0,45	0,27	0,459	0,275	0,468	0,28	0,476
95	0,188	0,319	0,192	0,325	0,195	0,332	0,199	0,338	0,203	0,345	0,206	0,351
120	0,149	0,253	0,152	0,258	0,155	0,263	0,158	0,268	0,161	0,273	0,163	0,278
150	0,119	0,202	0,121	0,206	0,124	0,21	0,126	0,214	0,128	0,218	0,131	0,222
185	0,097	0,164	0,098	0,167	0,1	0,171	0,102	0,174	0,104	0,177	0,106	0,18
240	0,074	0,126	0,076	0,129	0,077	0,131	0,079	0,134	0,08	0,136	0,082	0,139
300	0,0595	0,101	0,0607	0,103	0,0618	0,105	0,0630	0,107	0,0641	0,109	0,0653	0,111
400	0,0446	0,0758	0,0455	0,0773	0,0463	0,0788	0,0472	0,0804	0,0481	0,0819	0,0489	0,0834
500	0,0357	0,0606	0,0364	0,0618	0,0371	0,063	0,0378	0,0642	0,0385	0,0654	0,0392	0,0667

Tabelul 8.42 (continuare)

Secţiunea conductorului mm²	Temperatura conductorului 50 °C Cu	50 °C Al	55 °C Cu	55 °C Al	60 °C Cu	60 °C Al	65 °C Cu	65 °C Al	70 °C Cu	70 °C Al
1,5	13,3	—	13,5	—	13,8	—	14,0	—	14,2	—
2,5	7,98	13,6	8,11	13,8	8,25	14,0	8,39	14,3	8,53	14,5
4	4,98	8,49	5,07	8,6	5,16	8,79	5,24	8,94	5,33	9,1
6	3,32	5,66	3,38	5,76	3,44	5,86	3,5	5,96	3,56	6,06
10	2,0	3,39	2,03	3,45	2,06	3,51	2,1	3,58	2,13	3,64
16	1,25	2,12	1,27	2,16	1,29	2,2	1,31	2,23	1,33	2,27
25	0,798	1,36	0,811	1,38	0,825	1,4	0,839	1,43	0,853	1,45
35	0,57	0,970	0,58	0,987	0,589	1,0	0,6	1,02	0,609	1,04
50	0,399	0,679	0,406	0,691	0,413	0,703	0,42	0,715	0,427	0,727
70	0,285	0,485	0,29	0,494	0,295	0,502	0,3	0,511	0,303	0,52
95	0,21	0,357	0,214	0,364	0,217	0,370	0,221	0,376	0,225	0,383
120	0,166	0,283	0,169	0,288	0,172	0,293	0,175	0,299	0,178	0,304
150	0,133	0,226	0,135	0,23	0,138	0,234	0,14	0,238	0,142	0,242
185	0,108	0,184	0,110	0,187	0,112	0,19	0,113	0,194	0,115	0,197
240	0,083	0,141	0,085	0,144	0,086	0,146	0,187	0,149	0,089	0,151
300	0,0665	0,115	0,0676	0,115	0,0688	0,117	0,0699	0,119	0,0711	0,121
400	0,0498	0,0849	0,0507	0,0864	0,0516	0,0879	0,0524	0,0894	0,0533	0,091
500	0,0399	0,0679	0,0406	0,0691	0,0413	0,0703	0,042	0,0715	0,0427	0,0727

Notă Acest tabel se poate folosi cu suficientă exactitate şi în cazul liniilor aeriene. În cazul conductoarelor din oţel-aluminiu se ia în consideraţie numai secţiunea de aluminiu.

[2]) Deosebirile faţă de tabelul 2.21 sînt explicate la p. 83 nota 2.

Tabelul 8.43. **Inductivitatea** L **şi reactanţa inductivă** X_L **a cablurilor cu izolaţie de hîrtie** ($f = 50$ **Hz) în manta, cu** $3^1/_2$ **şi 4 conductoare de 0,6/1 kV**

Numărul şi secţiunea conductoarelor	L mH/km	X_L Ω/km	Numărul şi secţiunea conductoarelor	L mH/km	X_L Ω/km
			4 × 16	0,314	0,099
3 × 25/16	0,294	0,292	4 × 25	0,300	0,094
3 × 35/16	0,286	0,090	4 × 35	0,294	0,092
3 × 50/25	0,278	0,087	4 × 50	0,286	0,090
3 × 70/35	0,272	0,085	4 × 70	0,278	0,087
3 × 95/50	0,267	0,084	4 × 95	0,274	0,086
3 × 120/70	0,264	0,083	4 × 120	0,270	0,085
3 × 150/70	0,267	0,084	4 × 150	0,274	0,086
3 × 185/95	0,264	0,083	4 × 185	0,270	0,085
3 × 240/120	0,262	0,082	4 × 240	0,269	0,084
3 × 300/150	0,260	0,081	4 × 300	0,267	0,084
3 × 400/185	0,256	0,080	4 × 400	0,264	0,083

Tabelul 8.44. **Cabluri în manta cu trei conductoare de 0,6/1 ... 5,8/10 kV**

Numărul şi secţiunea conductoarelor mm²	0,6/1 kV L mH/km	0,6/1 kV X_L Ω/km	3,5/6 kV L mH/km	3,5/6 kV X_L Ω/km	5,8/10 kV L mH/km	5,8/10 kV X_L Ω/km
3 × 6	0,326	0,102	0,460	0,144	—	—
3 × 10	0,304	0,095	0,423	0,133	0,452	0,142
3 × 16	0,288	0,090	0,393	0,123	0,420	0,132
3 × 25	0,276	0,086	0,355	0,111	0,390	0,122
3 × 35	0,266	0,083	0,337	0,106	0,358	0,112
3 × 50	0,258	0,081	0,320	0,100	0,338	0,106
3 × 70	0,252	0,079	0,306	0,096	0,323	0,101
3 × 95	0,247	0,077	0,297	0,093	0,312	0,098
3 × 120	0,244	0,077	0,290	0,091	0,303	0,095
3 × 150	0,247	0,077	0,280	0,088	0,294	0,092
3 × 185	0,244	0,076	0,276	0,086	0,288	0,090
3 × 240	0,243	0,076	0,272	0,085	0,282	0,088
3 × 300	0,240	0,075	0,265	0,083	0,275	0,086
3 × 400	0,238	0,075	0,260	0,081	—	—

Tabelul 8.45 a. **Cabluri ecranate de 3,5/6...5,8/10 kV**

Numărul şi secţiunea conductoarelor mm²	3,5/6 kV L mH/km	3,5/6 kV X_L Ω/km	5,8/10 kV L mH/km	5,8/10 kV X_L Ω/km
3 × 10 re	0,425	0,134	0,455	0,143
3 × 16 re sau se	0,395	0,124	0,420	0,132
3 × 25 re sau se	0,370	0,116	0,390	0,123
3 × 35 re sau se	0,350	0,110	0,375	0,118
3 × 25 rm sau sm	0,355	0,111	0,375	0,118
3 × 35 rm sau sm	0,340	0,106	0,360	0,113
3 × 50 rm sau sm	0,320	0,100	0,340	0,107
3 × 70 rm sau sm	0,305	0,096	0,325	0,102
3 × 95 rm sau sm	0,295	0,092	0,310	0,098
3 × 120 rm sau sm	0,285	0,090	0,300	0,094
3 × 150 rm sau sm	0,280	0,088	0,295	0,092
3 × 185 rm sau sm	0,275	0,086	0,285	0,091
3 × 240 rm sau sm	0,270	0,084	0,280	0,088
3 × 300 rm sau sm	0,265	0,083	0,275	0,086

Tabelul 8.45 b. **Cabluri ecranate de 8,7/15 kV...17,3/30 kV**

Numărul şi secţiunea conductoarelor	8,7/15 kV L mH/km	8,7/15 kV X_L Ω/km	11,6/20 kV L mH/km	11,6/20 kV X_L Ω/km	17,3/30 kV L mH/km	17,3/30 kV X_L Ω/km
3 × 16 re	0,470	0,148	—	—	—	—
3 × 25 re	0,440	0,138	0,470	0,148	—	—
3 × 35 re	0,415	0,130	0,445	0,140	0,490	0,154
3 × 50 rm sau sm	0,375	0,118	0,400	0,125	0,440	0,138
3 × 70 rm sau sm	0,355	0,111	0,380	0,119	0,415	0,130
3 × 95 rm sau sm	0,340	0,107	0,360	0,113	0,400	0,125
3 × 120 rm sau sm	0,330	0,103	0,350	0,110	0,385	0,121
3 × 150 rm sau sm	0,320	0,100	0,340	0,107	0,370	0,116
3 × 185 rm sau sm	0,310	0,097	0,330	0,103	0,360	0,113
3 × 240 rm sau sm	0,300	0,094	0,320	0,100	0,345	0,108
3 × 300 rm sau sm	0,295	0,092	0,310	0,097	0,355	0,105

Tabelul 8.46. Cabluri SL de 3,5/6...17,3/30 kV

Numărul şi secţiunea conductoarelor mm²	3,5/6 kV		5,8/10 kV	
	L mH/km	X_L Ω/km	L mH/km	X_L Ω/km
3 × 6 re	0,545	0,171	—	—
3 × 10 re	0,500	0,157	0,525	0,165
3 × 16 re	0,465	0,146	0,485	0,152
3 × 25 re	0,430	0,136	0,450	0,142
3 × 35 re	0,410	0,129	0,425	0,137
3 × 35 rm	0,390	0,123	0,410	0,129
3 × 50 rm	0,370	0,116	0,385	0,121
3 × 70 rm	0,350	0,110	0,365	0,115
3 × 95 rm	0,340	0,107	0,355	0,111
3 × 120 rm	0,330	0,103	0,340	0,107
3 × 150 rm	0,320	0,100	0,330	0,104
3 × 185 rm	0,310	0,098	0,320	0,101
3 × 240 rm	0,305	0,095	0,315	0,099
3 × 300 rm	0,295	0,092	0,305	0,096

Tabelul 8.46 (continuare)

Numărul şi secţiunea conductoarelor mm²	8,7/15 kV		11,6/20 kV		17,3/30 kV	
	L mH/km	X_L Ω/km	L mH/km	X_L Ω/km	L mH/km	X_L Ω/km
3 × 16 re	0,525	0,165	—	—	—	—
3 × 25 re	0,485	0,152	0,510	0,160	—	—
3 × 35 re	0,460	0,144	0,486	0,153	0,525	0,165
3 × 50 rm	0,420	0,132	0,440	0,138	0,475	0,149
3 × 70 rm	0,395	0,124	0,415	0,130	0,450	0,141
3 × 95 rm	0,380	0,119	0,400	0,125	0,430	0,135
3 × 120 rm	0,365	0,114	0,385	0,121	0,415	0,130
3 × 150 rm	0,355	0,111	0,370	0,116	0,400	0,125
3 × 185 rm	0,345	0,108	0,360	0,113	0,390	0,122
3 × 240 rm	0,330	0,103	0,345	0,108	0,375	0,118
3 × 300 rm	0,325	0,102	0,335	0,105	0,360	0,113
3 × 70 rm/v	0,400	0,125	0,420	0,132	0,455	0,143
3 × 95 rm/v	0,390	0,122	0,405	0,127	0,440	0,138
3 × 120 rm/v	0,380	0,119	0,395	0,124	0,425	0,133
3 × 150 rm/v	0,370	0,116	0,385	0,121	0,415	0,130
3 × 185 rm/v	0,355	0,111	0,375	0,118	0,400	0,125

Tabelul 8.47. Impedanţa de secvenţă homopolară a cablurilor trifazate, la f = 50 Hz

Cabluri de 5,8/10 kV, în manta (cupru)		Cablu SL de 17,3/30 kV impregnat cu compound		Cablu cu un conductor de 64/110 kV cu ulei	
Secţiune mm²	Z_0 Ω/km	Secţiune mm²	Z_0 Ω/km	Secţiune mm²	Z_0 Ω/mm
35	1,27 + j 1,76	35	1,2 + j 1,2	120	0,8 + j 0,31
70	1,15 + j 1,52	150	1,12 + j 1,0	185	0.7 + j 0,27
150	1,13 + j 1,12	240	1,03 + j 0,83	300	0,60 + j 0,24

Tabelul 8.48. Cabluri Protodur (pe bază de PVC) de tip NYY, NYCY, NYFGbY de U_0/U = 0,6/1 kV. Inductanţa L şi reactanţa inductivă X_L (= 50 Hz)

Numărul şi secţiunea conductoarelor mm²	Conductoarele exterioare şi de întoarcere [1]			
	L mH/km	X_L Ω/km	L mH/km	X_L Ω/km
2 × 1,5 re	0,69	0,217	0,77	0,242
2 × 2,5 re	0,66	0,207	0,74	0,232
2 × 4 re	0,64	0,201	0,71	0,223
2 × 6 re	0,60	0,189	0,66	0,207
2 × 10 re	0,56	0,176	0,62	0,195
2 × 10 rm	0,54	0,17	0,60	0,189
2 × 16 re	0,53	0,167	0,59	0,185
2 × 16 rm	0,51	0,16	0,57	0,179
2 × 25 rm	0,51	0,16	0,57	0,179
2 × 35 rm	0,49	0,154	0,55	0,173
2 × 50 rm	0,49	0,154	0,54	0,17
2 × 70 rm	0,47	0,148	0,53	0,167
2 × 95 rm	0,47	0,148	0,52	0,163
2 × 120 rm	0,46	0,145	0,51	0,16
2 × 150 rm	0,46	0,145	0,51	0,16
2 × 185 rm	0,46	0,145	0,51	0,16
2 × 240 rm	0,46	0,145	0,51	0,16
2 × 300 rm	0,46	0,145	0,51	0,16
2 × 400 rm	0,45	0,141	0,51	0,16
	Un singur conductor [1]			
3 × 1,5 re	0,345	0,108	0,385	0,121
3 × 2,5 re	0,33	0,104	0,37	0,116
3 × 4 re	0,32	0,10	0,355	0,111
3 × 6 re	0,30	0,094	0,33	0,104
3 × 10 se	0,28	0,088	0,31	0,097
3 × 16 re	0,265	0,083	0,295	0,093
3 × 25 rm	0,255	0,080	0,285	0,090
3 × 35 rm sau sm	0,245	0,077	0,275	0,086
3 × 50 rm sau sm	0,245	0,077	0,27	0,085
3 × 70 rm sau sm	0,235	0,074	0,265	0,083
3 × 95 rm sau sm	0,235	0,074	0,26	0,082
3 × 120 rm sau sm	0,23	0,072	0,255	0,080
3 × 150 rm sau sm	0,23	0,072	0,255	0,080
3 × 185 rm sau sm	0,23	0,072	0,255	0,080
3 × 240 rm sau sm	0,23	0,072	0,255	0,080
3 × 300 rm sau sm	0,23	0,072	0,255	0,080
3 × 400 rm sau sm	0,225	0,071	0,255	0,080

1) În cazul cînd întoarcerea se realizează prin conductorul concentric, (v.pag. 544) la „Două conductoare şi conductor concentric" şi „Trei conductoare şi conductor concentric".

Tabelul 8.49. Cabluri Protodur (pe bază de PVC) de tip NYCY cu conductor concentric de U_0/U = 0,6/1 kV Inductanţa L şi reactanţa inductivă X_L(f = 50 Hz) între un conductor de nul sau de protecţie

Numărul şi secţiunea conductoarelor mm²	L mH/km	X_L Ω/km	Numărul şi secţiunea conductoarelor mm²	L mH/km	X_L Ω/km	Numărul şi secţiunea conductoarelor mm²	L mH/km	X_L Ω/km
Un singur conductor şi un conductor concentric			Două conductoare şi un conductor concentric			Trei conductoare [1]) şi un conductor concentric.		
1 × 1,5 re/1,5	0,29	0,091	2 × 1,5 re/1,5	0,39	0,122	3 × 1,5 re/1,5	0,34	0,107
1 × 2,5 re/2,5	0,25	0,079	2 × 2,5 re/2,5	0,37	0,166	3 × 2,5 re/2,5	0,33	0,104
1 × 4 re/4	0,22	0,069	2 × 4 re/4	0,35	0,110	3 × 4 re/4	0,32	0,10
1 × 6 re/6	0,21	0,066	2 × 6 re/6	0,33	0,109	3 × 6 re/6	0,30	0,094
1 × 10 re/10	0,18	0,057	2 × 10 re/10	0,31	0,098	3 × 10 re/10	0,28	0,088
1 × 16 re/16	0,17	0,053	2 × 16 re/16	0,29	0,091	3 × 16 re/16	0,26	0,082
1 × 25 rm/16	0,12	0,038	2 × 25 rm/16	0,28	0,088	3 × 25 sm/16	0,25	0,079
1 × 35 rm/16	0,12	0,038	2 × 35 rm/16	0,26	0,082	3 × 35 sm/16	0,24	0,075
1 × 50 rm/25	0,11	0,035	2 × 50 rm/25	0,26	0,082	3 × 50 sm/25	0,24	0,075
1 × 70 rm/35	0,11	0,035	2 × 70 rm/35	0,26	0,082	3 × 70 sm/35	0,24	0,075
1 × 95 rm/50	0,11	0,035	2 × 95 rm/50	0,26	0,082	3 × 95 sm/50	0,24	0,075
1 × 120 rm/70	0,10	0,031	2 × 120 rm/70	0,26	0,082	3 × 120 sm/70	0,23	0,072
1 × 150 rm/70	0,10	0,031	2 × 150 rm/70	0,26	0,082	3 × 150 sm/70	0,23	0,072
1 × 185 rm/95	0,10	0,031	2 × 185 rm/95	0,26	0,082	3 × 185 sm/95	0,23	0,072
1 × 240 rm/120	0,10	0,031	2 × 240 rm/120	0,26	0,082	3 × 240 sm/120	0,23	0,072
1 × 300 rm/150	0,10	0,031	2 × 300 rm/150	0,26	0,082			
1 × 400 rm/185	0,10	0,031	2 × 400 rm/185	0,26	0,082			
1 × 500 rm/240	0,10	0,031						

[1]) Valabil de la secţiunea de **25** mm² şi pentru cabluri cu conductoare rm.

Tabelul 8.50. Cabluri Protodur (pe bază de PVC) de U_0/U = 3,5/6 kV, U_0/U = 5,8/10 kV, U_0/U = 8,7/15 kV şi U_0/U = 11,6/20 kV. Inductanţa L şi reactanţa inductivă X_L (f = 50 Hz)

Numărul şi secţiunea conductoarelor	NYFGbY U_0/U = 3,5/6 kV		NYCEY [1]) U_0/U=5,8/10 kV		Numărul şi secţiunea conductoarelor	YHFGbY U_0/U= 8,7/15 kV		YHFGbY U_0/U=11,6/20 kV	
mm²	L mH/km	X_L Ω/km	L mH/km	X_L Ω/km	mm²	L mH/km	X_L Ω/km	L mH/km	X_L Ω/km
3 × 6 re	0,475	0,149	—	—	3 × 16 rm	0,48	0,151	—	—
3 × 10 re	0,435	0,137	0,45	0,142	3 × 25 rm	0,445	0,140	0,47	0,148
3 × 16 re	0,40	0,126	0,415	0,131	3 × 35 rm	0,425	0,134	0,45	0,141
3 × 25 rm	0,365	0,115	0,37	0,117	3 × 50 rm	0,40	0,126	0,42	0,132
3 × 35 rm sau sm	0,35	0,110	0,355	0,111	3 × 70 rm	0,375	0,118	0,395	0,124
3 × 50 rm sau sm	0,33	0,104	0,33	0,104	3 × 95 rm	0,36	0,113	0,38	0,119
3 × 70 rm sau sm	0,315	0,099	0,315	0,099	3 × 120 rm	0,35	0,110	0,365	0,115
3 × 95 rm sau sm	0,31	0,197	0,30	0,095	3 × 150 rm	0,335	0,105	0,35	0,110
3 × 120 rm sau sm	0,30	0,094	0,29	0,092	3 × 185 rm	0,325	0,102	0,34	0,107
3 × 150 rm sau sm	0,29	0,091	0,285	0,089	3 × 240 rm	0,315	0,099	0,33	0,104
3 × 185 rm sau sm	0,285	0,090	0,275	0,087	3 × 300 rm	0,305	0,096	0,32	0,10
3 × 240 rm sau sm	0,28	0,088	0,265	0,084	3 × 400 rm	0,295	0,093	0,31	0,097
3 × 300 rm sau sm	0,275	0,086	0,26	0,082					
3 × 400 rm sau sm	0,265	0,083	0,25	0,079					

[1]) Numai conductoare rotunde.

Capacitatea, momentul de încărcare şi curentul de punere la pămînt al cablurilor.

Cabluri în manta. Capacitatea cablurilor cu trei conductoare, în manta, se măsoară prin următoarele metode de legare;

— un conductor faţă de celelalte două conductoare şi faţă de mantaua de plumb · capacitatea C';

— toate conductoarele legate împreună faţă de mantaua de plumb — capacitatea C''.

Mărimea capacităţii din aceste două metode de legare se exprimă prin următoarele capacităţi parţiale:

C_{10} conductor/mantaua de plumb (capacitatea parţială), C_{12} conductor/conductor, (capacitate de serviciu).

Mărimea capacităţii:

$$C' = C_{10} + 2\ C_{12}\ [\mu F/km];$$

$$C'' = 3\ C_{10}\ \ [\mu F/km].$$

Deoarece C' şi C'' sînt cunoscute pentru fiecare cablu din măsurări, se pot determina din cele de mai sus capacităţile parţiale C_{10} şi C_{12} şi cu ajutorul acestora se calculează capacitatea mutuală C — care este capacitatea unui cablu în manta la care cele trei conductoare sînt legate la un sistem trifazat simetric fără nici o perturbaţie şi a cărui manta de plumb este legată la pămînt.

Capacitatea mutuală

$$C = C_{10} + 3\ C_{12}\ [\mu F/km].$$

Următoarele formule se aplică pentru curentul de încărcare I_c, în A/km, la funcţionarea trifazată simetrică şi pentru curentul de punere la pămînt I_e, în A/km, adică pentru curentul capacitiv care circulă printr-un punct de punere la pămînt:

— curentul de încărcare

$$I_c = \frac{U}{\sqrt{3}} \omega C \cdot 10^{-3};$$

— curentul de punere la pămînt

$$I_p = \sqrt{3}\ U\ \omega\ C_{10} \cdot 10^{-3}.$$

Cabluri cu cîmp radial (cabluri ecranate, cabluri cu un singur conductor, cabluri SL). În cazul acestor cabluri, capacitatea fiecărui conductor în raport cu ecranul de peste izolaţie este şi capacitatea mutuală C.

Curentul de încărcare I_c pentru funcţionarea trifazată simetrică şi curentul de punere la pămînt I_p se pot calcula cu ajutorul următoarelor formule pentru cabluri cu cîmp radial:

— curentul de încărcare:

$$I_c = \frac{U}{\sqrt{3}} \omega\ C \cdot 10^{-3},$$

în care U este tensiunea de lucru (între faze) a sistemului trifazat în kV;

— curentul de punere la pămînt:

$$I_p = \sqrt{3}\ U\ \omega C \cdot 10^{-3}.$$

Tabelul 8.51. **Capacitatea cablurilor în manta cu izolaţie de hîrtie pentru $U_0/U = 0,6/1$ kV [1])**

Secţiunea conductoarelor	Capacitatea unui conductor faţă de celelalte şi faţă de mantaua de plumb	Capacitatea tuturor conductoarelor faţă de mantaua de plumb	Capacitatea mutuală	Secţiunea conductoarelor	Capacitatea unui conductor faţă de celelalte şi faţă de mantaua de plumb	Capacitatea tuturor conductoarelor faţă de mantaua de plumb	Capacitatea mutuală
mm²	µF/km	µF/km	µF/km	mm²	µF/km	µF/km	µF/km
Cablu cu două conductoare				Cablu cu trei conductoare			
2 × 1,5 re	0,17	0,26	0,105	3 × 1,5 re	0,17	0,35	0,195
2 × 2,5 re	0,195	0,29	0,125	3 × 2,5 re	0,195	0,40	0,225
2 × 4 re	0,22	0,33	0,14	3 × 4 re	0,23	0,46	0,27
2 × 6 re	0,24	0,35	0,155	3 × 6 re	0,25	0,48	0,295
2 × 10 re	0,28	0,40	0,18	3 × 10 re	0,30	0,57	0,355
2 × 16 re	0,31	0,44	0,20	3 × 16 re	0,33	0,62	0,39
2 × 25 sm	0,49	0,67	0,325	3 × 16 se	0,43	0,74	0,52
2 × 35 sm	0,54	0,75	0,35	3 × 25 sm	0,46	0,81	0,56
2 × 50 sm	0,60	0,82	0,40	3 × 35 sm	0,52	0,93	0,63
2 × 70 sm	0,71	0,98	0,47	3 × 50 sm	0,68	1,2	0,82
2 × 95 sm	0,82	1,12	0,54	3 × 70 sm	0,75	1,28	0,91
2 × 120 sm	0,91	1,25	0,60	3 × 95 sm	0,85	1,42	1,04
				3 × 120 sm	0,96	1,68	1,16
				3 × 150 sm	0,93	1,69	1,11
				3 × 185 sm	1,0	1,73	1,21
				3 × 240 sm	0,98	1,73	1,18
				3 × 300 sm	1,08	1,97	1,29

[1]) Valorile capacităţilor cablurilor de $U_0/U = 0,6/1$ kV trebuie să se considere avînd în vedere că ele prezintă o mare dispersie. Valorile indicate pentru cabluri cu trei conductoare se aplică aproximativ şi pentru cabluri cu $3^1/_2$ şi 4 conductoare.

Tabelul 8.52. **Capacitatea, curentul de încărcare la sarcină trifazată simetrică şi curentul de punere la pămînt pentru cabluri în manta, cu izolaţie de hîrtie, pentru $U_0/U = 3,5/6$ kV pînă la $U_0/U = 11,6/20$ kV**

Tensiune nominală	Secţiune	Capacitatea unui conductor faţă de celelalte şi faţă de mantaua de plumb	Capacitatea tuturor conductoarelor faţă de mantaua de plumb	Capacitatea mutuală	Curentul de încărcare pe conductor	Curentul de punere la pămînt
U_0/U	mm²	µF/km	µF/km	µF/km	A/km	A/km
3,5/6 kV	3 × 10 re	0,165	0,36	0,19	0,207	0,392
	3 × 16 re	0,19	0,42	0,215	0,234	0,457
	3 × 25 re	0,22	0,46	0,255	0,278	0,500
	3 × 25 se	0,24	0,50	0,275	0,300	0,545
	3 × 35 se	0,28	0,55	0,33	0,360	0,600
	3 × 25 sm	0,25	0,53	0,285	0,311	0,577
	3 × 35 sm	0,28	0,56	0,33	0,360	0,610
	3 × 50 sm	0,33	0,66	0,385	0,420	0,720
	3 × 70 sm	0,38	0,76	0,44	0,480	0,830

Tabelul 8.52 (continuare)

Tensiune nominală	Secţiune	Capacitatea unui conductor faţă de celelalte şi faţă de mantaua de plumb	Capacitatea tuturor conductoarelor faţă de mantaua de plumb	Capacitatea mutuală	Curentul de încărcare pe conductor	Curentul de punere la pămînt
U_0/U	mm²	µF/km	µF/km	µF/km	A/km	A/km
3,5/6 kV	3 × 95 sm	0,40	0,78	0,47	0,512	0,850
	3 × 120 sm	0,47	0,92	0,55	0,600	1,000
	3 × 150 sm	0,50	1,00	0,58	0,630	1,090
	3 × 185 sm	0,56	1,08	0,66	0,720	1,180
	3 × 240 sm	0,61	1,21	0,71	0,775	1,320
	3 × 300 sm	0,63	1,24	0,74	0,805	1,350
5,8/10/kV	3 × 10 re	0,15	0,35	0,165	0,300	0,634
	3 × 16 re	0,175	0,38	0,20	0,362	0,687
	3 × 25 re	0,20	0,41	0,23	0,416	0,745
	3 × 25 sm	0,225	0,47	0,26	0,470	0,850
	3 × 35 sm	0,25	0,52	0,29	0,525	0,940
	3 × 50 sm	0,30	0,61	0,35	0,634	1,100
	3 × 70 sm	0,33	0,67	0,385	0,700	1,210
	3 × 95 sm	0,37	0,75	0,43	0,780	1,360
	3 × 120 sm	0,39	0,78	0,46	0,833	1,410
	3 × 150 sm	0,46	0,93	0,54	0,980	1,690
	3 × 185 sm	0,48	0,97	0,56	1,010	1,760
	3 × 240 sm	0,57	1,14	0,67	1,210	2,060
	3 × 300 sm	0,59	1,18	0,69	1,250	2,130
8,7/15 kV	3 × 16 re	0,14	0,32	0,155	0,426	0,87
	3 × 25 re	0,155	0,35	0,175	0,476	0,95
	3 × 35 re	0,17	0,38	0,19	0,517	1,03
	3 × 50 sm	0,21	0,47	0,235	0,640	1,28
	3 × 70 sm	0,23	0,50	0,26	0,705	1,36
	3 × 95 sm	0,26	0,56	0,30	0,815	1,52
	3 × 120 sm	0,28	0,61	0,32	0,870	1,66
	3 × 150 sm	0,31	0,66	0,355	0,970	1,80
	3 × 185 sm	0,33	0,70	0,38	1,030	1,90
	3 × 240 sm	0,36	0,76	0,41	1,120	2,07
11,6/20 kV	3 × 25 re	0,145	0,33	0,165	0,590	1,20
	3 × 35 re	0,16	0,36	0,18	0,652	1,31
	3 × 50 re	0,175	0,39	0,20	0,725	1,42
	3 × 70 sm	0,21	0,46	0,24	0,870	1,67
	3 × 95 sm	0,23	0,50	0,26	0,943	1,81
	3 × 120 sm	0,25	0,54	0,29	1,050	1,96
	3 × 150 sm	0,27	0,58	0,31	1,120	2,10
	3 × 185 sm	0,29	0,62	0,33	1,200	2,25
	3 × 240 sm	0,32	0,69	0,37	1,340	2,50

Tabelul 8.53. Capacitatea, curentul de încărcare la sarcină trifazată simetrică și curentul de punere la pămînt pentru cabluri cu cîmp radial, cu izolație de hîrtie, pentru U_0/U = 3,5/6 pînă la U_0/U = 17,3/30 kV (cabluri ecranate, cabluri SL și cabluri monofilare)

Tensiunea nominală U_0/U	Secțiune mm²	Capacitatea pe conductor µF/km	Curentul de încărcare pe conductor A/km	Curentul de punere la pămînt A/km
3,5/6 kV	3 × 6 re	0,20	0,22	0,66
	3 × 10 re	0,23	0,25	0,75
	3 × 16 re sau se	0,27	0,29	0,87
	3 × 25 re sau se	0,32	0,35	1,05
	3 × 35 re sau se	0,36	0,39	1,17
	3 × 25 rm sau sm	0,335	0,37	1,11
	3 × 35 rm sau sm	0,38	0,41	1,23
	3 × 50 rm sau sm	0,44	0,48	1,44
	3 × 70 rm sau sm	0,50	0,54	1,62
	3 × 95 rm sau sm	0,565	0,61	1,83
	3 × 120 rm sau sm	0,625	0,68	2,04
	3 × 150 rm sau sm	0,69	0,75	2,25
	3 × 185 rm sau sm	0,76	0,83	2,50
	3 × 240 rm sau sm	0,86	0,93	2,80
	3 × 300 rm sau sm	0,95	1,03	3,10
5,8/10 kV	3 × 10 re	0,205	0,37	1,11
	3 × 16 re	0,24	0,44	1,32
	3 × 25 re	0,275	0,50	1,50
	3 × 35 re	0,315	0,57	1,71
	3 × 25 rm	0,29	0,53	1,60
	3 × 35 rm	0,325	0,59	1,77
	3 × 50 rm	0,375	0,68	2,04
	3 × 70 rm	0,43	0,78	2,35
	3 × 95 rm	0,48	0,87	2,60
	3 × 120 rm	0,53	0,96	2,88
	3 × 150 rm	0,58	1,05	3,15
	3 × 185 rm	0,635	1,15	3,45
	3 × 240 rm	0,715	1,30	3,90
	3 × 300 rm	0,79	1,43	4,30
8,7/15 kV	3 × 16 re	0,225	0,61	1,83
	3 × 25 re	0,255	0,69	2,07
	3 × 35 re	0,28	0,76	2,28
	3 × 35 rm	0,305	0,83	2,50
	3 × 50 rm	0,35	0,95	2,85
	3 × 70 rm	0,395	1,07	3,20
	3 × 95 rm	0,44	1,20	3,60
	3 × 120 rm	0,48	1,30	3,90
	3 × 150 rm	0,525	1,43	4,30
8,7/15 kV	3 × 185 rm	0,57	1,55	4,65
	3 × 240 rm	0,64	1,74	5,22
	3 × 300 rm	0,70	1,90	5,70
	3 × 70 rm/v	0,38	1,03	3,09
	3 × 95 rm/v	0,41	1,12	3,36
	3 × 120 rm/v	0,44	1,20	3,60
	3 × 150 rm/v	0,48	1,31	3,93
	3 × 185 rm/v	0,52	1,42	4,26
11,6/20 kV	3 × 25 re	0,22	0,80	2,40
	3 × 35 re	0,245	0,89	2,67
	3 × 35 rm	0,265	0,96	2,88
	3 × 50 rm	0,30	1,09	3,27
	3 × 70 rm	0,335	1,22	3,66
	3 × 95 rm	0,37	1,34	4,02
	3 × 120 rm	0,405	1,47	4,40
	3 × 150 rm	0,445	1,61	4,83
	3 × 185 rm	0,48	1,74	5,22
	3 × 240 rm	0,53	1,89	5,67
	3 × 300 rm	0,58	2,10	6,30
	3 × 70 rm/v	0,325	1,18	3,54
	3 × rm/v f	0,35	1,27	3,81
	3 × rm/v f	0,375	1,36	4,08
	3 × rm/v f	0,405	1,47	4,41
	3 × rm/v f	0,44	1,60	4,80
17,3/30 kV	3 × 35 re	0,20	1,08	3,24
	3 × 35 rm	0,21	1,14	3,42
	3 × 50 rm	0,24	1,31	3,93
	3 × 70 rm	0,265	1,45	4,35
	3 × 95 rm	0,295	1,60	4,80
	3 × 120 rm	0,32	1,74	5,22
	3 × 150 rm	0,345	1,88	5,65
	3 × 185 rm	0,37	2,02	6,05
	3 × 240 rm	0,41	2,23	6,70
	3 × 300 rm	0,45	2,45	7,35
	3 × 70 rm/v	0,26	1,41	4,23
	3 × rm/v f	0,275	1,50	4,50
	3 × rm/v f	0,295	1,60	4,80
	3 × rm/v f	0,32	1,74	5,22
	3 × rm/v f	0,34	1,85	5,55

Notă. Pentru cablurile conductoare împletite, care au un înveliș de hîrtie metalizată peste izolație, valorile la U_0/U = 3,5/6 și la U_0/U = 5,8/10 kV se vor majora cu 3%.

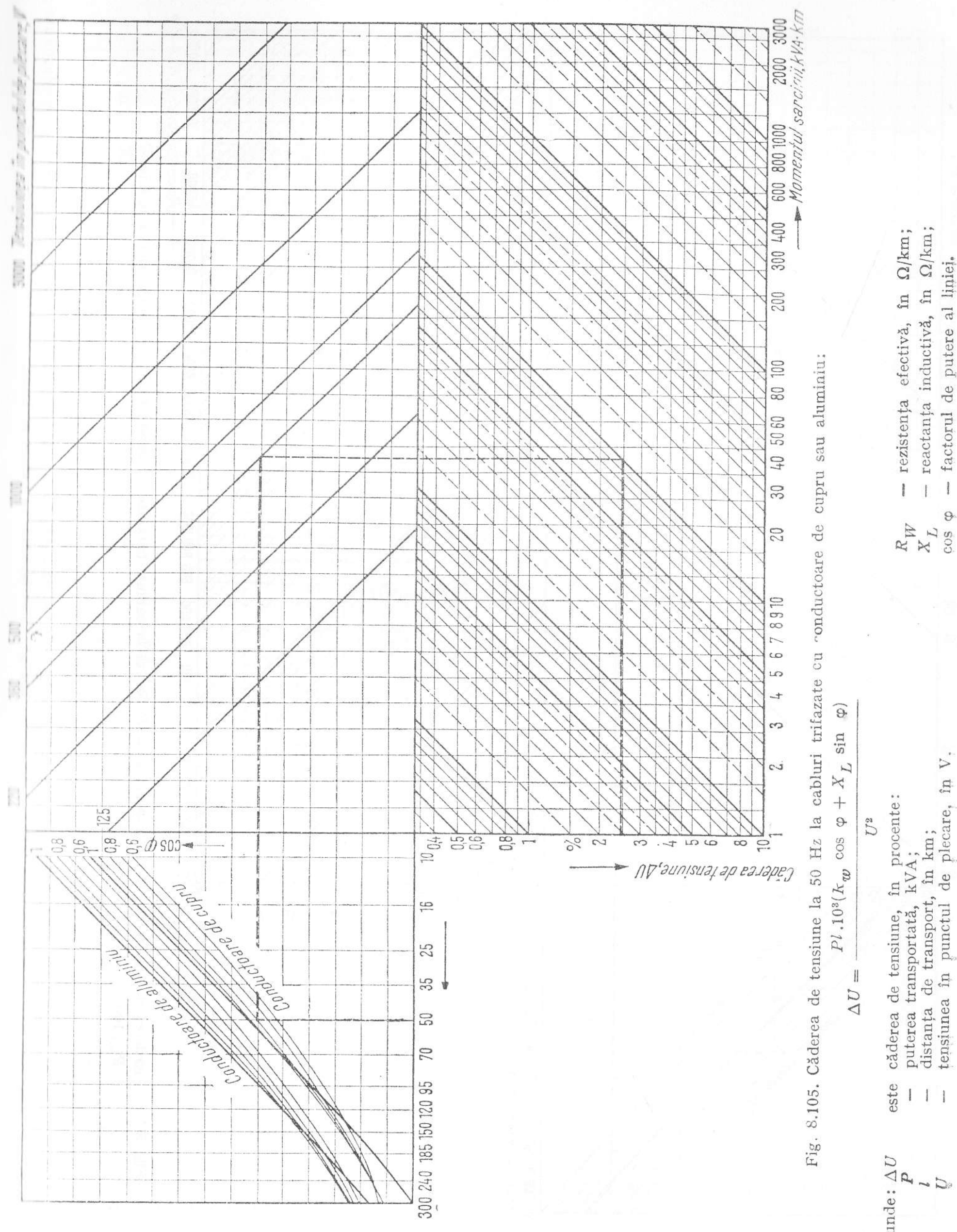


Fig. 8.105. Căderea de tensiune la 50 Hz la cabluri trifazate cu conductoare de cupru sau aluminiu:

$$\Delta U = \frac{Pl \cdot 10^3 (R_W \cos\varphi + X_L \sin\varphi)}{U^2}$$

unde: ΔU este căderea de tensiune, în procente; P — puterea transportată, kVA; l — distanța de transport, în km; U — tensiunea în punctul de plecare, în V; R_W — rezistența efectivă, în Ω/km; X_L — reactanța inductivă, în Ω/km; cos φ — factorul de putere al liniei.

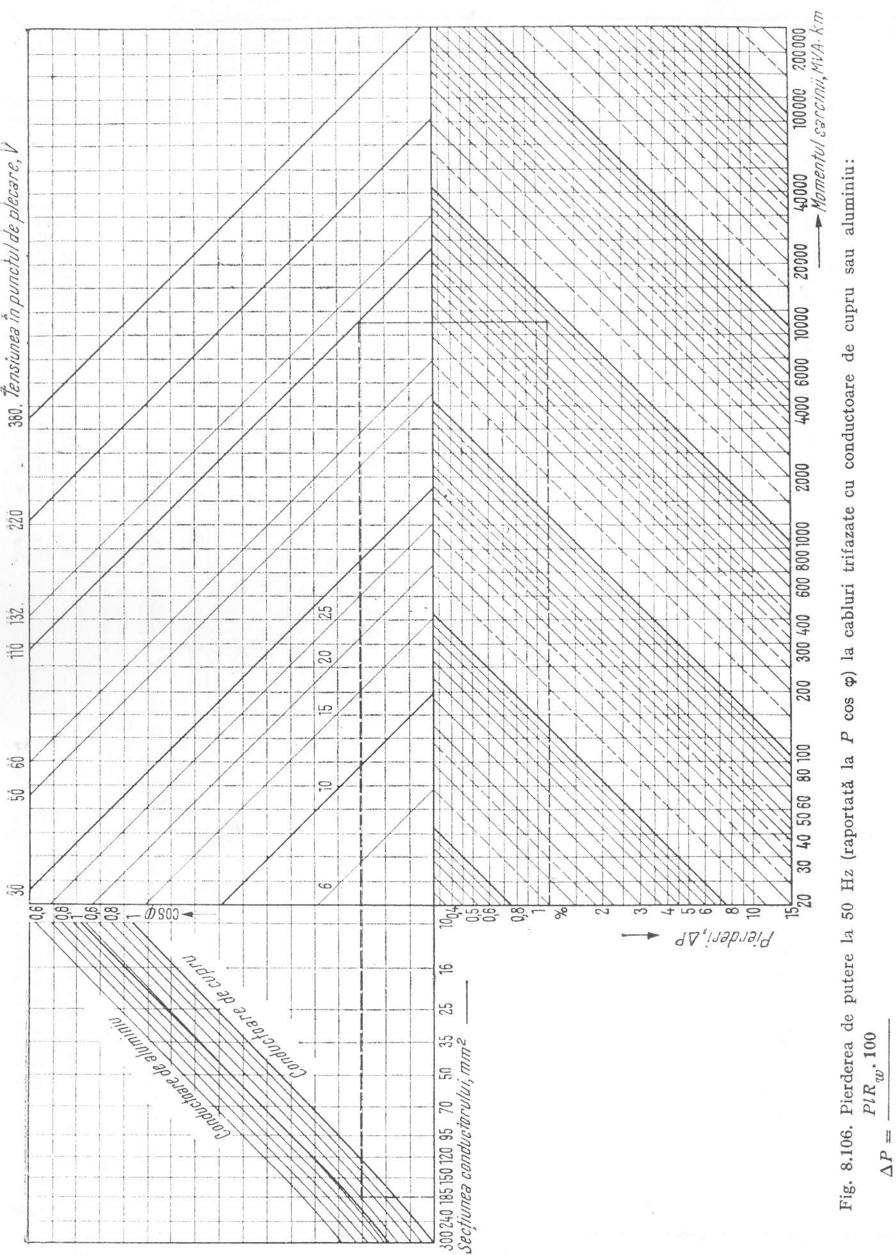


Fig. 8.106. Pierderea de putere la 50 Hz (raportată la $P \cos \varphi$) la cabluri trifazate cu conductoare de cupru sau aluminiu:

$$\Delta P = \frac{P l R_w \cdot 100}{U^2 \cos \varphi}$$

unde: ΔP este pierderea de putere, în %;
P — puterea transportată, în MVA;
l — distanţa de transport, în km;
U — tensiunea în punctul de plecare, în kV;
R_w — rezistenţa efectivă în Ω/km la temperatura de 45°C a conductorului;
$\cos \varphi$ — factorul de putere al liniei.

8.8. LINII ELECTRICE AERIENE

8.8.1. Caracteristici mecanice

Izolatoare şi conductoare

Tabelul 8.54. **Izolatoare cu inima plină de tip VK, în special pentru medie tensiune. Izolatoare tip tijă LP şi LG**

Tipul	Sarcina mecanică medie de rupere Mgf	Sarcina maximă de lucru Mgf	Efortul de încercare mecanică curentă Mgf	Lungimea liniei de fugă cm	Greutate kgf	Diametrul miezului izolatorului mm	Număr de aripioare	Lungimea totală mm	Montat cu: nucă, cu dimensiunea	Montat cu: bolţ pentru articulaţii cu dimensiunea
Izolatoare cu inimă plină, tip VK										
VK 60/2	5,5	1,37	3	45	6,5	60	2	230	11	—
VK 75/2	10	2,5	5,5	57	12,5	75	2	300	16	
Izolatoare tijă tip LP										
LP 60/5/380	5,5	1,37	3,8	50	7	60	5	380	11	
LP 60/5/390	6,7	1,67	4,7	50	7,5	60	5	390	16	
LP 60/7/490	6,7	1,67	4,7	70	8	60	7	490	16	—
LP 75/14/860 [1])	12,0	3	8,4	150	20	75	14	860	16	
LP 75/22/1240 [2])	12,0	3	8,4	230	28	75	22	1240	16	
LP 85/14/900 [1])	15,0	3,75	10,5	150	27	85	14	900	20	
LP 85/22/1280 [2])	15,0	3,75	10,5	230	36	85	22	1280	20	
LP 75/17/860	12,0	3	8,4	180	22	75	17 [3])	860	16	
LP 75/27/1240	12,0	3	8,4	285	31	75	27 [3])	1240	16	—
LP 85/17/900	15,0	3,75	10,5	180	30	85	17 [3])	900	20	
LP 85/27/1280	15,0	3,75	10,5	285	40	85	27 [3])	1280	20	
Izolatoare tijă tip LG										
LG 60/5/400	5,5	1,37	3,8	50	7	60	5	400		13
LG 60/5/420	6,7	1,67	4,7	50	7,5	60	5	420		19
LG 60/7/520	6,7	1,67	4,7	70	8	60	7	520		19
LG 75/14/900 [1])	12	3	8,4	150	20	75	14	900	—	19
LG 75/22/1270 [2])	12	3	8,4	230	28	75	22	1270		19
LG 85/14/920 [1])	15	3,75	10,5	150	27	85	14	920		19
LG 85/22/1300 [2])	15	3,75	10,5	230	36	85	22	1300		19
LG 75/17/900	12	3	8,4	180	22	75	17 [3])	900		19
LG 75/27/1270	12	3	8,4	285	31	75	27 [3])	1270	—	19
LG 85/17/920	15	3,75	10,5	180	30	85	17 [3])	920		19
LG 85/27/1300	15	3,75	10,5	285	40	85	27 [3])	1300		19

[1]) Se pot folosi şi izolatoare cu 9 aripioare.
[2]) Se pot folosi şi izolatoare cu 14 aripioare.
[3]) Pentru exploatare în zone cu condiţii nefavorabile (număr de elemente mărit, cu acelaşi diametru şi aceeaşi lungime totală).

Tabelul 8.55. **Izolatoare suport N și St**

Pentru tensiuni nominale sub 1 kV			Pentru tensiuni nominale peste 1 kV		
Tipul	Valoarea medie a sarcinii de rupere Mgf	Greutate ≈ kgf	Tipul	Valoarea medie a sarcinii de rupere Mgf	Greutate ≈ kgf
N 95 cu o rilă	1,8	0,55	St 10 St 15	1,25 1,25	1,5 2,3
N 95/2 cu două rile	1,8	0,60	St 20 St 30	1,50 1,50	3,4 6,5

Tabelul 8.56. **Sarcinile admisibile pentru suporturile izolatoarelor**

Tipul izolatoarelor	Suport drept	Forța orizontală kgf	Greutate ≈ kgf	Suport curb	Forța orizontală F_0 în funcție de forța verticală F_v: $F_{v\,max}$ kgf	$F_{o\,max}$ kgf	Greutate kgf
				Pentru joasă tensiune			
N 95 și N 95/2	SG 95	450	0,6	SBV E 95 SBV D 230/95 SBV D 300/95	110	160	2,17 2,70 2,88
				Pentru înaltă tensiune			
St 10, St 15	SGZ 10/15	125	1,2	SBE 10/15 SBD 10/15	75	65	2,5 3,9
St 20	SGZ 20	145	1,57	SBE 20 SBD 20	108	55	3,6 4,85
St 30	SGZ 30	165	2,45	SBD 30	117	90	7,85
St 10, St 15 St 20 St 30	SGK 10/15 SGK 20 SGK 30	300 365 420	1,65 2,1 2,45				

Semnificația notațiilor: SG — suport drept; SGZ — suport drept cu extremitatea cilindrică; SGK — suport drept cu extremitate conică; SB — suport curb, cu indicațiile literale: V — cu lungime mărită și întărită; D — pentru folosire ca izolator de trecere; E — pentru fixare prin înșurubare; M — pentru fixare la zidărie.

Tabelul 8.57. **Corelarea izolatoarelor de tip suport, cu inimă plină și tijă pentru tensiuni peste 1 kV**

Tensiune kV	Numărul de elemente pentru diferite condiții de lucru: normale	nefavorabile	foarte nefavorabile
	Izolatoare suport ST		
3	1 element St 10	1 element St 10	1 element St 10
6	1 element St 10	1 element St 10	1 element St 20
10	1 element St 10	1 element St 10	1 element St 30
15	1 element St 20	1 element St 20	1 element St 30
20	1 element St 20	1 element St 30	[1])
30	1 element St 30	[1])	[1])
	Izolatoare cu inimă plină VK		
10	1 element VK 60/2	1 element VK 60/2	1 element VK 60/2
15	1 element VK 60/2	1 element VK 60/2	1 element VK 75/2
20	1 element VK 60/2	1 element VK 75/2	1 element VK 75/2
30	1 element VK 75/2	2 elemente VK 60/2	2 elemente VK 60/2
45	2 elemente VK 60/2	2 elemente VK 75/2	3 elemente VK 75/2
60	2 elemente VK 75/2	3 elemente VK 75/2	4 elemente VK 75/2
110	4 elemente VK 75/2	5 elemente VK 75/2	6 elemente VK 75/2
150	6 elemente VK 75/2	7 elemente VK 75/2	8 elemente VK 75/2

[1]) Sînt necesare măsuri speciale sau se folosesc izolatoare tip lanț.

Tabelul 8.58. **Izolatoare tip tijă LP și LG**

Tensiune kV	Număr de elemente pentru diferite condiții de lucru: normale	mai puțin favorabile	nefavorabile	foarte favorabile
15	1 element 60/50	1 element 60/5	1 element 60/5	
20	1 element 60/5	1 element 60/5	1 element 60/7	
30	1 element 60/5	1 element 60/7	2 elemente 60/5	
45	2 elemente 60/5	1 element 60/5 și 1 element 60/7	2 elemenete 60/7	
60	1 element 75/9	1 element 75/14	1 element 75/17	1 element 75/22
110	1 element 75/22	1 element 75/27	2 elemenete 75/14	2 elemente 75/17
150	2 elemente 75/14	2 elemente 75/17	1 element 75/14 și 1 element 75/22	1 element 75/17 și 1 element 75/27
220	2 elemente 75/22	2 elemenete 75/27	2 elemente 75/22 și 1 element 75/14	3 elemente 75/22
380	2 elemente 75/22 și 1 element 75/14	3 elemente 75/22	3 elemente 75/27	3 elemente 75/22 și 1 element 75/14

Notă. Valorile indicate pentru miezuri cu diametrul de 75 mm se aplică și în cazul miezuriior cu diametrul de 85 mm.

Tabelul 8.59. **Conductoare de cupru, aluminiu şi oţel utilizate în R.S.R.**

Material	Secţiune: valoare nominală mm²	Secţiune: valoare calculată mm²	Fire: număr	Fire: diametru mm	Diametrul conductorului; valoare nominală mm²	Greutatea conductorului kgf/km
Cupru	10	9,73	7	1,33	4,0	89
	16	15,54	7	1,68	5,0	142
	25	24,50	7	2,11	6,3	224
	35	33,81	7	2,49	7,5	309
	35	34,01	19	1,51	7,5	312
	50	48,83	19	1,81	9,0	448
	70	68,40	19	2,14	10,7	628
	95	91,77	19	2,49	12,5	842
	120	117,29	37	2,01	14,1	1078
	150	145,78	37	2,27	15,7	1339
	185	178,71	37	2,49	17,4	1642
	240	236,06	37	2,85	19,9	2169
	240	234,24	61	2,21	19,9	2153
	300	292,19	61	2,47	22,2	2686
Aluminiu	16	15,89	7	1,7	5,1	44
	25	24,25	7	2,1	6,3	67
	35	34,36	7	2,5	7,5	94
	50	49,48	7	3,0	9,0	135
	50	48,36	19	1,8	9,0	133
	70	65,82	19	2,1	10,5	181
	95	93,27	19	2,5	12,5	256
	120	117,00	19	2,8	14,0	322
	150	147,10	37	2,25	15,7	406
	185	181,60	37	2,5	17,5	511
	240	242,50	61	2,25	20,2	670
	300	299,40	61	2,50	22,5	827
	400	400,10	61	2,89	26,0	1105
Oţel	10	10,0	7	1,35	4,0	80
	16	15,9	7	1,70	5,1	128
	25	24,2	7	2,10	6,3	194
	35	34,4	7	2,50	7,5	275
	50	49,5	7	3,00	9,0	396
	50	48,3	19	1,80	9,0	389
	70	65,8	19	2,10	10,5	528
	95	93,3	19	2,50	12,5	751
	120	117,0	19	2,80	14,0	941
	95	94,0	37	1,80	12,6	759
	120	116,2	37	2,00	14,7	936
	150	147,1	37	2,25	15,8	1187
	185	181,6	37	2,50	17,5	1465

Notă. Valorile cuprinse în acest tabel sînt conform STAS 687-56, 3032-69 şi 3734-60.

Tabelul 8.60. **Constantele materialelor conductoare**

Denumirea	Rezistenţa la tracţiune de durată kgf/mm²	Rezistenţa de încercare kgf/mm²	Greutatea specifică γ kgf/cm³	Coeficientul de dilatare termică ε_t 1/grd	Coeficientul de alungire elastică α cm²/kgf	Valori de calcul: $\frac{\alpha}{\varepsilon_t}$	Valori de calcul: $24\ \varepsilon t$
Cupru	30	40	$8,9 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{1,3 \times 10^{6}}$	0,0453	$4,08 \times 10^{-4}$
Bronz B I	40	50	$8,9 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{1,3 \times 10^{6}}$	0,0453	$4,08 \times 10^{-4}$
Bronz Bz II	50	60	$8,65 \times 10^{-3}$	$1,66 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{1,3 \times 10^{6}}$	0,0464	$3,98 \times 10^{-4}$
Bronz Bz III	62	70	$8,65 \times 10^{-3}$	$1,66 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{1,3 \times 10^{6}}$	0,0464	$3,98 \times 10^{-4}$
Aluminiu	12	18 [1]	$2,7 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{0,56 \times 10^{6}}$	0,0778	$5,52 \times 10^{-4}$
Aldrey	24	30	$2,7 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{0,60 \times 10^{6}}$	0,0725	$5,52 \times 10^{-4}$
Oţel Ol I	32	40	$7,8 \times 10^{-3}$	$1,23 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{1,92 \times 10^{6}}$	0,0425	$2,95 \times 10^{-4}$
Oţel Ol II	56	70	$7,8 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{1,96 \times 10^{6}}$	0,0465	$2,64 \times 10^{-4}$
Oţel Ol III........	90	120	$7,8 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2,00 \times 10^{6}}$	0,0454	$2,64 \times 10^{-4}$
Oţel Ol IV........	110	150	$7,8 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2,0 \times 10^{6}}$	0,0454	$2,64 \times 10^{-4}$
Al/OL 11,3:1	[2]		$3,2 \times 10^{-3}$	$2,09 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{0,62 \times 10^{6}}$	0,0772	$5,02 \times 10^{-4}$
Al/Ol 7,7 : 1	[2]		$3,36 \times 10^{-3}$	$1,92 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{0,72 \times 10^{6}}$	0,0724	$4,61 \times 10^{-4}$
Al/Ol 6 : 1	[2]		$3,5 \times 10^{-3}$	$1,85 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{0,77 \times 10^{6}}$	0,0703	$4,44 \times 10^{-4}$
Al/Ol 4,3 : 1	[2]		$3,75 \times 10^{-3}$	$1,76 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{0,83 \times 10^{6}}$	0,0685	$4,22 \times 10^{-4}$
Al/Ol 1,7 : 1	[2]		$4,66 \times 10^{-3}$	$1,49 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{1,09 \times 10^{6}}$	0,0617	$3,58 \times 10^{-4}$
Al/Ol 1,4 : 1......	[2]		$4,91 \times 10^{-3}$	$1,43 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{1,16 \times 10^{6}}$	0,0602	$3,43 \times 10^{-4}$

[1]) Cu diametrul conductorului 2,5 mm şi mai mult 17 kgf/mm².

[2]) Pentru conductoarele de oţel-aluminiu, rezistenţa la tracţiune de durată a conductorului trebuie să se ia de 0,9 × suma rezistenţelor de tracţiune de durată a fiecăruia dintre materiale, ţinînd seamă de raportul secţiunilor de aluminiu faţă de cele de oţel.

Tabelul 8.61. **Conductoare de oţel-aluminiu utilizate în R.S.R.**

Secţiunea nominală	Inima de oţel			Mantaua de aluminiu			Conductor complet			Raportul secţiunilor
	Număr de fire	Diametrul firului	Secţiunea calculată a conductorului	Număr de fire	Diametrul firului	Secţiunea calculată a conductorului	Diametrul conductorului	Secţiunea conductorului	Greutate: valori medii	
mm²		mm	mm²		mm	mm²	mm	mm²	kgf/km	Al/OL
Construcţia conductorului: NORMALĂ										
16/2,5	1	1,8	2,55	6	1,80	15,30	5,4	17,85	61,8	6
25/4	1	2,25	4,0	6	2,25	23,90	6,8	27,90	96,6	6
35/6	1	2,7	5,70	6	2,7	34,30	8,1	40,00	139,2	6
50/8	1	3,2	8,00	6	3,2	48,30	9,6	56,30	195,3	6
70/12	7	1,45	11,60	26	1,8	66,20	17,6	77,80	272,4	5,7
95/15	7	1,65	15,00	26	2,1	90,00	13,4	105,00	366,0	6
120/21	7	1,95	20,90	26	2,45	122,60	15,7	143,50	503,0	5,8
150/25	7	2,15	25,90	26	2,7	148,90	17,3	174,30	612,0	5,8
185/32	7	2,4	31,70	26	3,0	183,80	19,2	215,50	757,0	5,8
240/40	7	2,7	40,10	26	3,4	236,00	21,7	276,10	968,0	5,9
300/50	7	3,0	49,50	26	3,8	294,9	24,2	344,40	1205	6
400/75	19	2,25	75,5	28	4,24	395,2	28,2	470,70	1689	5,3
450/75	19	2,25	75,50	63	3,0	445,1	29,25	520,6	1828	5,9
680/85	19	2,4	85,9	54	4	678,6	36	764,5	2570	7,7
Construcţia conductorului: ÎNTĂRITĂ										
95/55	7	3,2	56,3	12	3,2	96,5	16	152,8	712	1,7
120/28	7	2,25	27,8	30	2,25	119,4	15,75	147,2	549	4,3
150/36	7	2,55	35,7	30	2,55	153,3	17,85	189	705	4,3
185/43	7	2,8	43,10	30	2,8	184,8	19,6	227,9	650	4,3
240/56	7	3,2	56,20	30	3,2	241,2	22,4	217,4	1110	4,3
300/69	19	2,15	69	30	3,6	305,4	25,15	374,4	1390	4,5
400/85	19	2,4	85,90	30	4,1	395,6	28,4	481,5	1773	4,5
450/97	19	2,55	96,9	68	2,9	449	30,2	545,9	2016	4,6

Notă: Valorile indicate sînt luate din STAS 3000-69.

Tabelul 8.62. **Eforturi de tracţiune** maximă

Fire de cupru	12 kgf/mm²
Conductor de cupru	19 kgf/mm²
Conductor de bronz Bz I	24 kgf/mm²
Conductor de bronz Bz II	30 khf/mm²
Conductor de bronz Bz III	35 kgf/mm²
Conductor de aluminiu	8 kgf/mm²
Conductor de aldrey	12 kgf/mm²
Conductor Al-Ol 11,3 : 1	9,5 kgf/mm²
Conductor Al-Ol 7,7 : 1	10,0 kgf/mm²
Conductor Al-Ol 6 : 1	11,0 kgf/mm²
Conductor Al-Ol 4,3 : 1	11,5 kgf/mm²
Conductor Al-Ol 1,7 : 1	19,0 kgf/mm²
Conductor Al-Ol 1,4 : 1	20,0 kgf/mm²
Conductor de oţel I	16 kgf/mm²
Conductor de oţel II	28 kgf/mm²
Conductor de oţel III	45 kgf/mm²
Conductor de oţel IV	55 kgf/mm²

Tabelul 8.63. Săgeata maximă, în cm, pentru conductoare de aluminiu. Efort maxim de tracţiune 6 kgf/mm²

Lungimea deschiderii m	Secţiunea, valoarea nominală, în mm²								
	16	25	35	50	70	95	120	150	185
10	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
20	25,4	25	25	25	25	25	25	25	25
30	55	44	39	39	39	39	39	39	39
40	96	75	63	54,5	54,5	54,5	54,5	54,5	54,5
50	149	115	95	82	72	72	72	72	72
60	214	164	134	114	100	89	89	89	89
70	260	222	180	152	132	116	108	106	106
80	374	288	234	195	169	147	137	128	126
90	472	364	295	244	210	182	168	158	149
100	588	448	362	299	256	220	220	188	178
110			436	361	307	262	240	222	210
120			518	427	363	308	282	260	244
130			607	499	423	357	326	300	283
140			703	577	488	412	374	332	320
150			806	662	558	470	426	390	363
160					633	531	480	441	407
170					712	596	540	491	457
180					797	666	602	547	505
190					886	741	667	606	559
200					980	818	736	668	616
210					1079	899	808	733	675
220					1183	985	844	800	735
230					1291	1073	964	871	800
240					1404	1167	1047	946	869
250					1522	1264	1133	1014	940
260							1223	1098	1013
270							1317	1185	1088
280							1414	1276	1165
290							1514	1369	1244
300							1618	1465	1325

Tabelul 8.64. Săgeata maximă, în cm, pentru conductoare Al-Ol (Al/Ol 6 : 1) Efort maxim de tracţiune 8 kgf/mm²

Lungimea deschiderii m	Secţiunea, valoarea nominală, în mm²											
	16/2,5	25/4	35/6	50/8	70/12	95/15	120/20	150/25	185/30	210/35	240/40	300/50
10	7,7	7,7	7 7	7,7	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2
20	18	17,5	17,5	17,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5
30	38	30	29	29	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5	30,5
40	67,5	51	43	43	44	44	44	44	44	44	44	44
50	105	79	64	57	59	59	59	59	59	59	59	59
60	152	114	92	79	74	74	74	74	74	74	74	74
70	206	155	125	107	97	91	91	91	91	91	91	91
80	269	202	164	139	124	113	108	108	108	108	108	108
90	341	256	207	174	154	140	129	126	126	126	126	126
100	421	316	255	214	188	169	156	148	146	146	146	146
110	510	383	309	258	227	202	183	175	167	167	167	167
120	606	456	367	306	268	237	215	205	195	191	188	188
130		535	430	358	312	275	250	236	225	219	214	210
140		620	498	414	359	316	285	271	257	249	244	235
150		712	572	475	412	361	326	306	290	281	275	265

Tabelul 8.64 (continuare

Lungimea deschiderii mm	Secțiunea, valoarea nominală, în mm²											
	16/2,5	25/4	35/6	50/8	70/12	95/12	120/20	150/25	185/30	210/35	240/40	300/50
160					465	409	365	344	325	315	308	296
170					523	459	409	385	363	351	342	328
180					586	512	455	428	403	389	379	363
190					651	569	504	473	445	429	418	399
200					720	628	556	521	489	472	459	437
210					792	690	611	571	536	517	502	477
220					868	756	668	624	585	563	547	519
230					949	824	727	678	635	613	593	563
240					1032	896	790	735	687	662	641	608
250					1118	969	854	796	742	714	692	656
260							921	858	800	769	744	704
270							991	921	859	825	799	755
280							1063	989	920	884	855	806
290							1138	1058	983	945	913	861
300							1215	1130	1049	1007	974	918
310											1036	976
320											1100	1035
330											1167	1098
340											1236	1161
350											1306	1226

Formule pentru calculul săgeții

Notații folosite

- a — lungimea deschiderii, în cm;
- f — săgeata, în cm;
- σ — tensiunea în conductor, în kgf/cm²;
- σ_z — tensiunea în conductor la -5°C și sarcină suplimentară, în kgf/cm²;
- g_c — greutatea conductorului, în kgf/cm;
- γ — greutatea conductorului, în kgf/cm³;
- γ_z — greutatea conductorului inclusiv sarcina suplimentară raportată la secțiunea nominală, în kgf/cm³;
- d — diametrul conductorului, în mm;
- q — secțiunea conductorului, în mm²;
- H — efortul de tracțiune orizontal, în kgf;
- V, (V_1 V_2) — componenta verticală a sarcinii, în kgf;
- E — modulul de elasticitate al materialului conductorului, în kgf/cm²;
- — temperatura, în °C;
- ε — coeficientul de dilatare termică al materialului conductorului pe grad

Greutatea conductorului cu sarcina suplimentară

$$\gamma_z = \gamma + \frac{0{,}18\sqrt{d}}{q}.$$

Normativele românești[1]) precizează sarcinile de chiciură prin grosimi ale depunerii. Greutatea conductorului cu sarcină suplimentară este:

$$\gamma_z = \gamma + 0{,}9\,\frac{\pi\, b(b+d)}{q},$$

unde b este grosimea stratului de chiciură, variind între 13 mm și 30 mm în funcție de regiunea meteorologică a țării și de importanța, respectiv tensiunea liniei.

Săgeata totală $f = \dfrac{a^2\gamma}{8\sigma}$ sau $f = \dfrac{a^2 g}{8H}$.

Săgeata la -5°C și sarcină suplimentară

$$f = \frac{a^2\gamma_z}{8\sigma_z}.$$

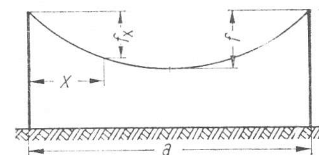
Ecuația de stare

$$\sigma_2^3 + \sigma_2^2\left[\frac{a^2\gamma_1^2}{24\sigma_1^2} + (t_2 - t_1)\varepsilon E - \sigma_1\right] = \frac{a^2\gamma_2^2 E}{24}.$$

În locul valorilor σ_1, γ_1, t_1 pentru starea de încărcare 1, sau σ_2, γ_2, t_2 pentru starea de încărcare 2, în ecuație se pot folosi valorile σ_z și γ_z cu $t = -5$°C.

Săgeata în orice punct sau deschidere, în cm

$$f_x = \frac{4f\,x(a-x)}{a^2}.$$



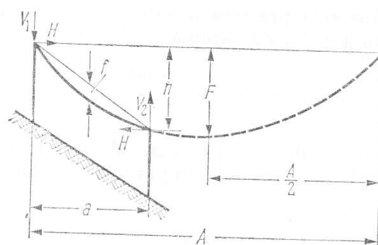
Săgeți la puncte de suspensie de înălțime diferită, în cm

$$A = a + \frac{2Hh}{ag} = a + \frac{ah}{4f};$$

$$F = f\left(1 + \frac{h}{4f}\right)^2 = \frac{A^2 g}{8H};$$

---

[1]) Aceste indicații sînt prevăzute în normativul 1-L1-67, privind construcția liniilor electrice aeriene.

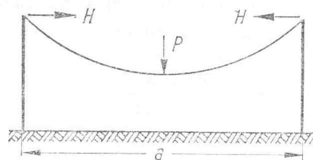


$$V_1 = \frac{A}{2} g_c; \quad V_2 = \left(\frac{A}{2} - a\right) g_c.$$

Formulele sînt valabile şi cînd $a > A/2$. În acest caz V_2 îşi schimbă semnul şi acţionează ca o presiune în jos.

Săgeata în cazul sarcinii datorite greutăţii conductorului şi unei sarcini concentrate P (sarcina de montaj, în kgf):

$$f = \frac{1}{H}\left(\frac{a^2 g}{8} + \frac{Pa}{4}\right).$$



Calculul săgeţii cu aceeaşi lungime de arc şi diferite deschideri

Se dă săgeata f_1 la deschiderea a_1.

Se cere săgeata f_2 la noua deschidere a_2, cu aceeaşi lungime a arcului

$$f_2^2 = f_1^2 \frac{a_2}{a_1} + \frac{3}{8} a_2(a_1 - a_2).$$

Distanţa dintre conductoare

Distanţa minimă a, în m, dintre conductoare trebuie să fie

$$a = k\sqrt{f + l_K} + \frac{U_n}{150},$$

unde: l_k este lungimea lanţului de izolatoare, în m;
k — coeficient în conformitate cu tabelul 8.65;
f — săgeata maximă, în m;
U_n — tensiunea nominală, în kV.

Tabelul 8.65 a. Distanţe şi unghiuri de oscilaţie

Materialul conductoarelor	Cupru, bronz, oţel	Secţiune nominală mm²	10,16	25,35	50, 70, 95
	Aluminiu şi aliaje de aluminiu	Secţiune nominală mm²	25, 35, 50, 70, 95, 120, 150	> 150	—
	Oţel-aluminiu	Secţiune nominală mm²	16/2,5 25/4 35/6 50/8 70/12	44/32 50/30 95/15 120/20 150/25 125/30	95/55 105/75 120/70 170/40 şi mai mare conf. tab. 8.64
Unghiul de oscilaţie al conductorului la vînt		grade	peste 65°	peste 55° pînă la 65°	peste 40° pînă la 55°
Conductoare la aceeaşi înălţime, alăturate		coeficientul k	0,7	0,65	0,62
Conductoare la două sau mai multe înălţimi		coeficientul k	0,95	0,85	0,75
Dispoziţia conductoarelor sub formă de triunghi echilateral		coeficientul k	0,75	0,70	0,65

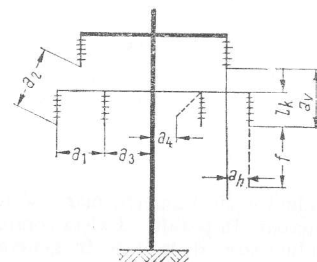
În normativul românesc 1-L1-67 pentru construcţia liniilor aeriene de energie electrică, valoarea coeficientului k, la aşezări oarecare ale conductoarelor, este precizată prin relaţia

$$k = k_h + (k_v - k_h)\frac{a_v^2}{a_v^2 + a_h^2},$$

în care: a_v şi a_h reprezintă cotele indicate în figura alăturată, iar coeficienţii k_h şi k_v au valorile din tabelul 8.65 b.

În continuare urmărind figura alăturată, se precizează următoarele distanţe:

a_3 — distanţa minimă faţă de elementele constructive legate la pămînt în cazul unui conductor în poziţie de repaus, în m;



a_4 — distanţa minimă în cazul deplasării conductorului la o sarcină dată de vînt acţionînd asupra conductorului şi lanţului de izolatoare, în m.

În reţele care funcţionează cu neutrul nelegat rigid la pămînt

$$a_3 = 0{,}1 + \frac{U_n}{150}\ (\text{minimum } 0{,}2\ \text{m})\,;\quad a_4 = \frac{U_n}{150}.$$

În reţele care funcţionează cu neutrul legat rigid la pămînt

$$a_3 = a_4 = \frac{U_n}{150}.$$

Tabelul 8.65 b. **Valorile coeficienţilor k_h, k_v**

Materialul şi secţiunea conductoarelor			Aşezarea conductoarelor			
			Vertical k_v		Orizontal k_h	
Cupru, bronz, oţel mm²	Aluminiu şi aliaje de aluminiu mm²	Oţel-aluminiu mm²	$U_n \geq 35$ kV	$U_n < 35$ kV	$U_n \geq 35$ kV	$U_n < 35$ kV
10...16	16...150	16... 70	0,95	0,85	0,70	0,65
25...35	> 150	95...150	0,85	0,75	0,65	0,62
70...95	—	185...300	0,75	0,70	0,62	0,60
> 95	—	340...450	0,70	0,70	0,60	0,60

În tabelul 8.66 sînt prezentate distanţele minime faţă de elementele constructive legate la pămînt conform normativului românesc 1-L1-67.

Tabelul 8.66. **Distanţe minime faţă de elementele constructive legate la pămînt, conform normativului românesc 1-L1-67**

Condiţia climatică	Distanţe minime, în cm						
	6—15 kV	20 kV	25 kV	35 kV	110 kV	220 kV	400 kV
Temperatura + 15 °C Viteza vîntului: 0 m/s	20	25	30	40	90	180	290
Temperatura + 15 °C Viteza vîntului: 20 m/s	10	15	20	30	80	160	250
Temperatura + 15 °C Viteza vîntului maximă	7	10	15	25	40	60	100

Conductoare fasciculate

În locul unui singur conductor cu diametru mare, se folosesc, din motive electrice (v. p. 588), mai multe conductoare în paralel. Există conductoare fasciculate compuse din două, trei sau patru conductoare, distanţate în general la 400 mm (v. fig. 8.113 şi tabelul 8.74). Distanţa dintre conductoare este menţinută cu ajutorul unor piese de distanţare montate la intervale de 50—80 m. În cazul a două conductoare, acestea pot fi dispuse orizontal, unul lîngă celălalt, sau vertical — unul deasupra celuilalt. Trei conductoare se dispun sub forma unui triunghi echilateral, iar patru — sub forma unui pătrat. Este avantajos să se folosească dimensiuni de conductoare normalizate de lungime standardizată şi cu aceeaşi metodă de montare, folosindu-se acelaşi echipament de montaj ca şi în cazul conductoarelor individuale. Din motive economice, se caută să se monteze mai multe conductoare în acelaşi timp.

În cazul oscilaţiilor produse de vînt, piesele de distanţare împiedică apariţia aceleiaşi frecvenţe de oscilaţie în conductoarele individuale şi în plus, reduc amplitudinea oscilaţiilor.

Pentru eforturile de tracţiune în conductoarele individuale ale conductorului fasciculat, se aplică aceleaşi principii ca şi în cazul conductoarelor simple. Pentru conductoarele alăturate ale unui conductor fasciculat factorul de ecranare al conductorului deplasat de vînt este 0,8. Atunci cînd se calculează rezistenţa la torsiune a stîlpilor metalici, la proiectare se ia în consideraţie numai un sfert din tracţiunea maximă într-o singură direcţie a conductoarelor fasciculate, în cazul stîlpilor situaţi în zone cu sarcină suplimentară normală; în cazul zonelor în care se constată apariţia regulată a unor sarcini suplimentare mai mari decît cele normale se consideră numai jumătate din acest efort maxim de tracţiune.

Tabelul 8.67. **Calculul influenţei presiunii dinamice a vîntului asupra elementelor constructive, conform normativului românesc 1-L1-67**

Zona meteorologică [1])	Presiunea dinamică, kgf/m²				Coeficienţi de majorare a presiunii dinamice funcţie de înălţimea de la sol — H, în m			
	vînt maxim		vînt simultan cu chiciură					
	$U_n \leq$ 110 kV	220 — 400 kV	$U_n \leq$ 110 kV	220 — 400 kV	$H \leq 30$	$30 < H \leq 50$	$50 < H \leq 75$	$75 < H \leq 100$
I, a	76,5	100	25	25	1,0	1,4	1,7	1,9
I, b	56	76,5	14	18				
II	45,5	76,5	10,5	18				
zone muntoase, altitudini peste 1000 m	100	120	25	30				

[1]) Teritoriul României este împărţit în trei zone distincte din punct de vedere al condiţiilor meteorologice de calcul.

Sarcina dată de vînt pe stîlpi cu zăbrele, pătraţi sau dreptunghiulari

În cazul stîlpilor cu zăbrele, pătraţi sau dreptunghiulari, trebuie să se ţina seamă numai de suprafaţa porţiunii de stîlp expusă vîntului. Sarcina dată de vînt pe construcţiile cu zăbrele situate pe direcţia vîntului se poate neglija.

Pentru valorile presiunilor date de vînt vezi tabelul 8.67. Înălţimea de suspendare a conductorului constituie factorul determinant al presiunii dinamice apărută în urma sarcinii dată de vînt pe conductoare.

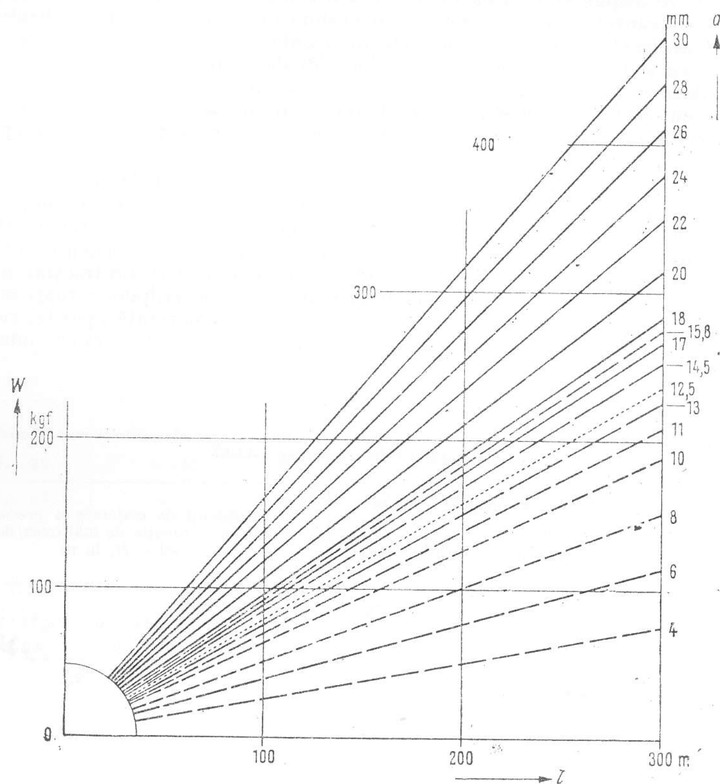


Fig. 8.107. Sarcina dată de vînt pe conductoare la înălţimi pînă la 100 m deasupra nivelului solului:

W = $cpdl$; presiunea vîntului, în kgf; în care:
d este diametrul conductorului, în mm;
l — lungimea conductorului, în m;
c — coeficientul de presiune dinamică al conductoarelor;
p — presiunea dinamică pentru înălţimi pînă la 15 m: 44 kgf/m^2; idem, pentru înălţimi pînă la 40 m; 52,5 kgf/m^2; idem, pentru înălţimi pînă la 100 m; 67,5 kgf/m^2.

Sarcina dată de vînt pe elemente constructive

$$W = cpF$$

unde: F este suprafaţa lovită de vînt, în m^2;
p — presiunea vîntului, în kgf/m^2;
c — coeficientul de presiune dinamică.

Coeficienţi de presiune dinamică c pentru:

Suprafeţe plane cu zăbrele din oţel laminat 1,4
Stîlpi cu zăbrele, pătraţi sau dreptunghiulari construiţi din oţel laminat 2,6
Pereţi plani din zăbrele executate din ţevi 1,1
Stîlpi cu zăbrele, pătraţi sau dreptunghiulari construiţi din ţevi.... 2,0
Stîlpi de lemn, stîlpi din ţeavă de oţel, stîlpi din beton armat cu secţiune circulară 0,7
Stîlpi din ţeavă de oţel şi stîlpi din beton armat cu secţiune exagonală sau octogonală 1,0
Conductoare cu diametrul pînă la 12,5 mm 1,2
Conductoare cu diametrul peste 12,5 pînă la 15,8 mm 1,1
Conductoare cu diametrul peste 15,8 mm .... 1,0.

Tabelul 8.68. **Scara intensităţii vîntului**

Intensitate Beaufort	Descriere	Efectul vîntului		Viteza vîntului m/s
		pe uscat	pe mare	
0	calm	lipsă de vînt; fumul se ridică vertical	suprafaţa mării liniştită ca o oglindă	0 – 0,2
1	curent slab de aer	direcţia vîntului indicată de deviaţia fumului, dar nu de giruete	valuri mici, cu aspect solzos, fără zimţi de spumă	0,3 – **1,5**
2	briză uşoară	vîntul se simte pe obraz; frunzele foşnesc uşor; giruetele se mişcă	valuri mici, scurte încă, dar mai distincte; crestele valurilor apar sticloase, dar nu se sparg	**1,6 – 3,3**
3	briză slabă	frunzele şi ramurile mici se mişcă; vîntul desfăşoară un steag uşor (fanion)	crestele valurilor încep să se spargă; spumă cu aspect sticlos; apariţii singulare de mici valuri cu creste albe	**3.4 – 5,4**
4	briză mijlocie	ridică praf şi hîrtii; mişcă ramuri şi crăci mici subţiri	valurile sînt încă mici, dar mai lungi; apar creste albe, dar totuşi destul de întinse	**5,5 – 7,9**
5	briză accentuată	pomii mici cu frunze încep să oscileze; se formează creste de valuri pe lacuri	valurile moderate, care iau formă vizibil lungă; creste albe de valuri peste tot; se poate vedea în mod cu totul ocazional spumă	**8,0 – 10,7**
6	briză puternică	crăcile mari în mişcare; zumzet în firele de telegraf; dificultăţi la folosirea umbrelelor	începe formarea valurilor mari; crestele se sparg şi lasă în urmă mari suprafeţe albe de spumă; apare o oarecare pulverizare a apei în atmosferă	**10,8 – 13,8**
7	vînt puternic	copaci în mişcare cu tot trunchiul; rezistenţă sensibilă întîmpinată la mers împotriva vîntului	marea se înalţă; spuma albă produsă prin spargerile valurilor începe să se orienteze în şuviţe după direcţia vîntului	**13,9 – 17,1**

Tabelul 8.68 (continuare)

Intensitate Beaufort	Descriere	Efectul vîntului		Viteza vîntului m/s
		pe uscat	pe mare	
8	furtună	ramuri rupte din copaci; mersul în aer considerabil îngreuiat	valuri de înălţime moderată, cu creste de lungime considerabilă; pulberea de apă începe să fie purtată de vînt de pe muchiile crestelor valurilor. Se formează spumă în fîşii clar vizibile în direcţia vîntului	17,2–20,7
9	furtună puternică	deteriorări uşoare la clădiri (coşuri şi ţigle de acoperiş smulse)	valuri înalte; şuviţe groase de spumă în direcţia vîntului, marea începe mişcarea de „rulare"; pulberea lichidă poate înrăutăţi vizibilitatea	20,8–24,4
10	furtună grea	copaci smulşi; deteriorări considerabile la clădiri	valuri foarte înalte cu creste lungi care se sparg; marea albă de spumă, cu o mişcare masivă de ridicare; vizibilitatea redusă de pulberea lichidă	24,5–28,4
11	furtună tip uragan	deteriorări extinse (foarte rareori pe uscat)	valuri excepţional de înalte; vizibilitatea împiedicată de pulberea lichidă	28,5–32,6
12	uragan	–	atmosfera saturată de spumă şi pulbere lichidă; marea complet albă; vizibilitate considerabil redusă; imposibilitate de a vedea obiecte la distanţă	32,7–36,9
13	–	–	–	37,0–41,4
14	–	–	–	41,5–46,1
15	–	–	–	46,2–50,9
16	–	–	–	51,0–56,0
17	–	–	–	> 56,1

Calcule de rezistenţă pentru stîlpi

Stîlpi de lemn:

– Stîlpi simpli de susţinere; diametrul la vîrf Z (aproximativ), în cm;

$$Z = 0{,}65\ H + k\sqrt{ad} \qquad (k = 0{,}22 \text{ pentru lemn de pin})$$

unde: H este înălţimea totală a stîlpului, în m;
a – lungimea deschiderii, în m;
d – suma diametrelor tuturor conductoarelor de pe stîlp, în mm.

– Stîlpi A; momentul de inerţie necesar J, în kgf m², la jumătatea lungimii nesprijinite la care apare flambajul:

$$J = n5F_p l^2 \text{ (minim)}$$

unde: n este coeficientul de siguranţă la flambaj ($n = 4$ pentru lemn de pin);
F_p – forţa de compresiune, în 10^3 kgf;
l – lungimea de flambaj nesprijinită, în m, de la mijlocul cîrligului sau bolţului de la extremitatea superioară a stîlpului pînă la jumătate din adîncimea de îngropare.

Tabelul 8.69. **Eforturi admisibile**

Efortul	Lemn de pin kgf/cm²	Esenţe tari kgf/cm²
Întindere sau încovoiere	145	190
Presiunea în direcţia fibrelor	110	120
Presiunea perpendiculară pe direcţia fibrelor	35	50
Forfecarea în direcţia fibrelor	18	20
Forfecarea perpendiculară pe direcţia fibrelor	30	40

Notă. În acest tabel s-a considerat rezistenţa de încovoiere pentru lemnul rotund de 500 kgf/cm² pentru brad şi de 800 kgf/cm² pentru esenţă tare.

Stîlpi metalici

Tabelul 8.70. **Eforturi admisibile pentru elemente constructive metalice la sarcini normale**

Efortul	Marca oţelului	Efortul admisibil kgf/cm²
Întindere şi încovoiere	Ol 37 Ol 52	1600 2400
Forfecare la nituri şi bolţuri	Ol 34 resp. 4 D Ol 44 resp. 5 D	1600 2400
Presiunea pe gaură la nituri şi bolţuri	Ol 34 resp. 4 D Ol 44 resp. 5 D	4000 4800
Forfecare la şuruburi obişnuite	4 D	1120
Presiune pe gaură la şuruburi obişnuite	4 D	2500
Întindere la şuruburi obişnuite şi bolţuri	4 D 5 D	1120 1500

Bare cu efort de flambaj

Rezistența barei F_s trebuie înmulțită cu coeficientul de flambaj ω, apoi bara se poate calcula ca un element supus la întindere în raport cu σ_{adm}, dar fără scăderea niturilor. Deci

$$\frac{\omega F_s}{q} \leqslant \sigma_{adm}.$$

Tabelul 8.71. **Coeficientul de flambaj ω pentru diverse rapoarte de subțirime pentru bare de oțel Ol 37**

λ	ω	λ	ω	λ	ω	λ	ω
0	1	60	1,30	130	2,85	190	6,10
10	1	70	1,41	140	3,31	200	6,75
20	1,04	80	1,55	150	3,80	210	7,45
30	1,08	90	1,71	160	4,32	220	8,17
40	1,14	100	1,90	170	4,88	230	8,93
50	1,21	110	2,11	180	5,47	240	9,73
		120	2,43			250	10,55

Se pot introduce și valori intermediare. Semnificația simbolului λ din tabel este

$$\lambda = \frac{l}{i},$$

unde: $i = \sqrt{\dfrac{J}{q}}$

l este lungimea liberă a barei la care apare flambajul, în cm;
q — secțiunea barei, în porțiunea neslăbită de găuri, în cm²;
J — momentul de inerție corespunzător al barei în porțiunea neslăbită de găuri, în cm⁴.

Elemente supuse la eforturi de flambaj și încovoiere

În cazul elementelor supuse unui moment de încovoiere M care se adaugă sarcinii de compresiune F_p, dacă elementele au centrul de greutate situat la o distanță mai mică (sau egală) față de frontiera întinderii datorite încovoierii decît față de frontiera compresiunii datorite încovoierii, se aplică următoarea formulă

$$\frac{\omega F_p}{q} + 0{,}9\,\frac{M}{W_d} \leqslant \sigma_{adm};$$

W_d se raportează la o axă principală a secțiunii neslăbite; același lucru este valabil și pentru momentul M.

În cazul elementelor ale căror centre de greutate sînt mai aproape de frontiera compresiunii de încovoiere decît de frontiera întinderii de încovoiere, se aplică următoarele două condiții:

$$\frac{\omega F_p}{q} + 0{,}9\,\frac{M}{W_d} \leqslant \sigma_{adm} \quad \text{și} \quad \frac{\omega F_p}{q} + \frac{300 + 2\lambda}{1\,000}\,\frac{M}{W_z} \leqslant \sigma_{adm};$$

W_d și W_z sînt modulele de rezistență ale secțiunii neslăbite a grinzii, în cm³, raportate la frontiera compresiunii de încovoiere sau la frontiera întinderii datorite încovoierii.

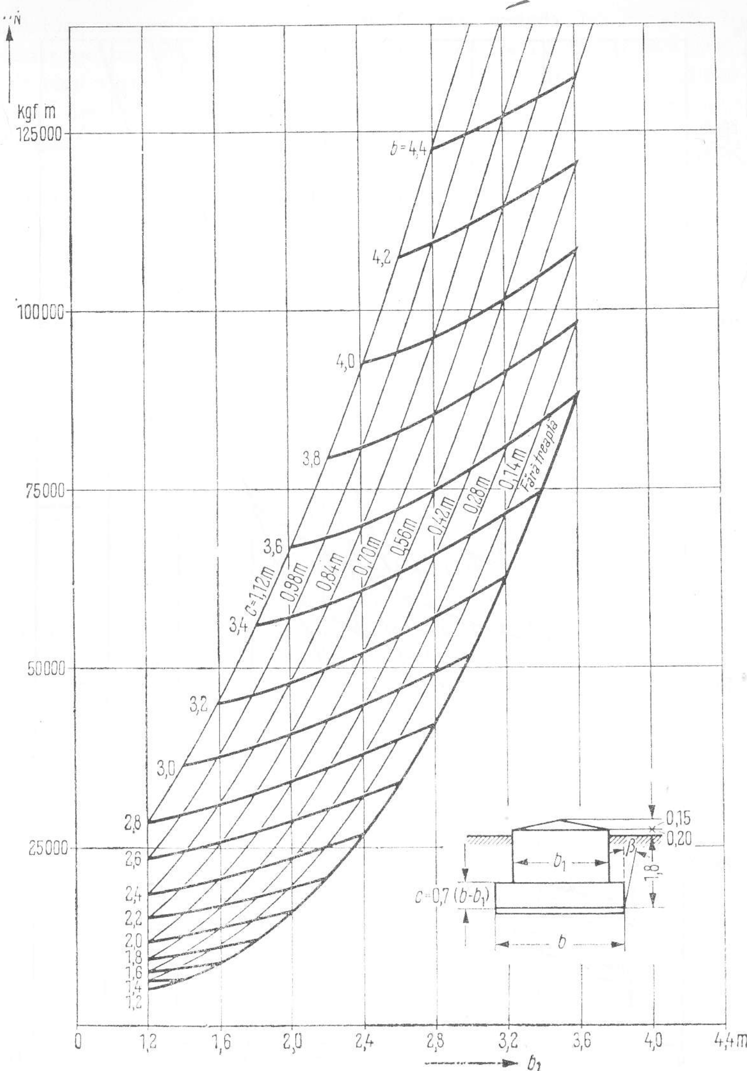


Fig. 8.108. Dimensiunile fundațiilor tip monolit cu adîncimea de îngropare de 1,8 m:
M_N — momentul efectiv la baza fundației, în kgfm;
b — lățimea fundației, în m;
b_1 — lățimea fundației la partea superioară, în m; sol de fundare: γ_e — 1600 kgf/m³; $\beta = 5°$; $\rho = 35°$; $\mu = 0{,}4$; $\sigma = 1$ kgf/cm².

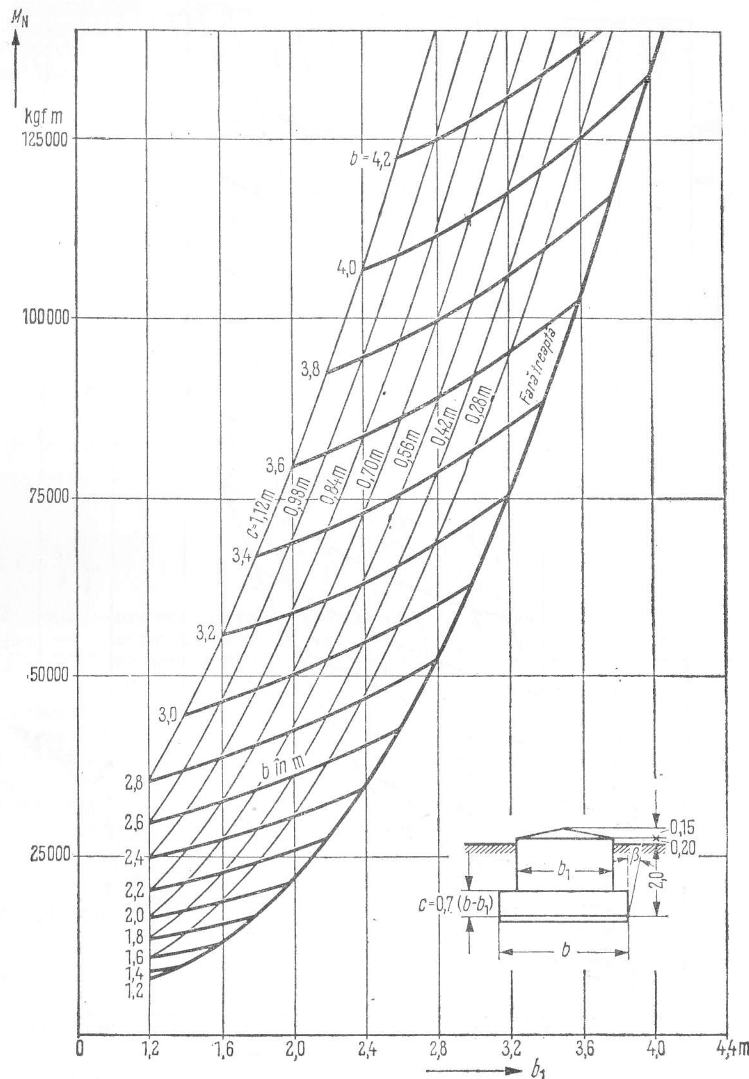


Fig. 8.109. Dimensiunile fundațiilor tip monolit cu adîncimea de îngropare de 2 m:
M_N — momentul efectiv la baza fundației, în kgfm;
b — lățimea fundației, în m;
b_1 — lățimea fundației la partea superioară, în m;
sol de fundare: $\gamma_e = 1600$ kgf/m³; $\beta = 5°$; $\rho = 35°$; $\mu = 0{,}4$; $\sigma = 1$ kgf/cm².

Fundațiile trebuie să fie dimensionate folosind metoda lui Bürklin. Dimensiunile necesare pentru fundații de tip monolit, executate cu trepte sau fără trepte, pentru adîncimi variabile de 1,8 și 2,0 m și pentru încărcări pînă la 125 000 kgf m se pot obține din fig. 8.108 și 8.109. Se consideră următoarele ipoteze: sol de fundare normal cu greutatea de 1600 kgf/cm³ și unghiul β dintre rezultanta împingerii pămîntului și normala la peretele fundației de 5°; un coeficient de frecare între beton și pămînt $\mu = 0{,}4\%$; unghiul taluzului natural al solului $\rho = 35°$; o presiune admisibilă pe sol de 1,0 kgf/cm² la adîncimea de 1 m.

8.8.2. Caracteristici electrice

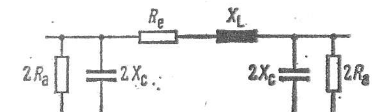


Fig. 8.110. Diagrama circuitului echivalent monofazat pentru o secțiune de linie aeriană simetrică (schema în π).

Rezistența

$$R_e = \frac{\rho}{q} \ \Omega/\text{km pe fază}, \qquad (8.39)$$

unde: ρ este rezistivitatea, în Ωmm²/km (v. fig. 8.111);
q — secțiunea conductorului liniei, în mm².

Creșterea rezistenței conductorului liniei datorită efectelor de răsucire și săgeții este de 2 ... 4% și datorită efectului pelicular (skin) la frecvențe de lucru pînă la 60 Hz de 0 ... 2%, în funcție de secțiune.

Reactanța inductivă X_L (reactanța de secvență directă și inversă)

(X_L în Ω/km pe fază)

Linii aeriene cu conductoare funie

Linie monofazată (două conductoare izolate):

linie simplu circuit

$$X_L = \omega L = \omega \frac{\mu_0}{2} \ln \frac{d_{12}}{0{,}779\, r} =$$

$$= \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{d_{12}}{r} + \frac{1}{4} \right). \qquad (8.40)$$

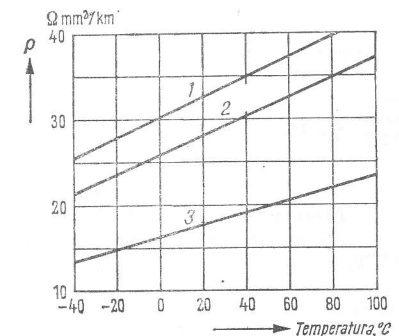


Fig. 8.111. Rezistivitatea ρ a materialelor conductoarelor de linie:
1 — Aldrey; 2 — Aluminiu; 3 — Cupru.

Linie trifazată cu transpunere simetrică:

— linie simplu circuit

$$X_L = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d_m}{0,779\, r}; \tag{8.41}$$

— linie cu dublu circuit

$$X_L = \omega \frac{\mu_0}{2} \ln \frac{D_m}{0,779\, r}; \tag{8.42}$$

unde: ω este frecvenţa unghiulară, în s^{-1} ($\omega = 2\pi f = 314\ s^{-1}$ la 50 Hz);
f — frecvenţa de lucru, în Hz;
L — inductanţa, în H/km;
μ_0 — permeabilitatea vidului; $\mu_0 = 4\pi\, 10^{-4}$ H/km;
r — raza conductorului, în mm;
d_m, D_m — distanţele medii geometrice între conductoare, în mm;

$$d_m = \sqrt[3]{d_{12}\ d_{23}\ d_{31}} \tag{8.41 a}$$

$$D_m = \sqrt[3]{\frac{d_{12}\, d_{23}\, d_{31}\, d_{1II}\, d_{2III}\, d_{3I}}{d_{1I}\ d_{2II}\ d_{3III}}}; \tag{8.42 a}$$

d_{12} — distanţa din centrul conductorului 1 la centrul conductorului 2, în mm.

Indicii 1, 2, 3 se referă la conductoarele unui circuit; I, II, III indică conductoarele celui de al doilea circuit (v. tabelul 8.76).

În tabelul 8.72 sînt date valori pentru distanţele medii geometrice între conductoare d_m ale liniilor aeriene trifazate. Pentru reactanţa inductivă X_L se dau valori medii în Ω/km pe fază la $f = 50$ Hz pentru o linie trifazată cu un circuit, cu transpuneri simetrice, cu conductoare de OL—Al, în funcţie de distanţa medie geometrică d_m dintre conductoare.

Tabelul 8.72. **Distanţe medii geometrice între conductoare d_m ale liniilor aeriene trifazate (50 Hz)**

Tensiunea kV	0,5	10	15	20	30	60	110	150	220	380
d_m, m	0,4...0,6	0,8...1	1,2...1,4	1,4...1,6	1,6...2	2,4...3,2	3,6...5,6	5...6,2	6,2...8	9...19

Linii aeriene cu conductoare fasciculate simetrice

X_L se calculează din ecuaţiile (8.40 ... 8.42) folosindu-se în locul valorii numerice 0,779, valoarea

$$\xi_1 = \sqrt[n]{0,779}, \tag{8.43}$$

iar în locul razei conductorului, raza echivalentă

$$r_e = \xi_2\, r_T, \tag{8.44}$$

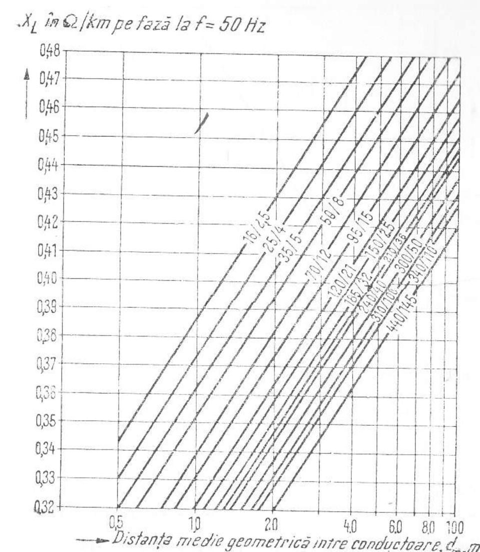


Fig. 8.112. Reactanţa inductivă X_L a unei linii trifazate cu un circuit, cu transpuneri simetrice, cu conductoare de Ol-Al.

unde: ξ_1 este un factor numeric din tabelul 8.73;
ξ_2 — un factor numeric din fig. 8.113;
r_T — raza conductoarelor componente din fascicul, în mm;
s — distanţa dintre conductoarele componente din fascicul, în mm;
n — numărul conductoarelor componente din fascicul;
d_T — diametrul conductoarelor componente din fascicul, în mm.

Tabelul 8.73. **Conductoare fasciculate: factorul ξ_1**

Numărul conductoarelor componente n	2	3	4
ξ_1	0,882	0,92	0,94

Exemplu: LEA 380 kV, trifazată, simplu circuit. Configuraţia fazelor este conform fig. 8.114, fiecare fază fiind compusă din patru conductoare de Ol—Al 240/40 mm², cu distanţa dintre conductoarele componente ale fazelor s = 400 mm.

Parametrii liniei sînt:

r_T = 10,95 mm (tabelul 8.74); ξ_1 = 0,94 (tabelul 8.73)
s/r_T = 400/10,95 = 36,53; ξ_2 = 16,2 fig. 8.113)
r_e = 16,2 · 10,95 = 177,5 mm (ecuaţia 8.44);
$d_m = \sqrt[3]{15\,000 \cdot 15\,000 \cdot 30\,000} = 18\,900$ mm (ecuaţia 8.41 a).

Reactanţa inductivă a fiecărui conductor fasciculat conform ecuaţiilor (8.41), (8.43) şi (8.44) pentru f = 50 Hz este:

$$X_L = 314\ \frac{4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi}\ \ln \frac{18\,900}{0,94 \times 177,5} = 0,297\ \Omega/\text{km pe fază.}$$

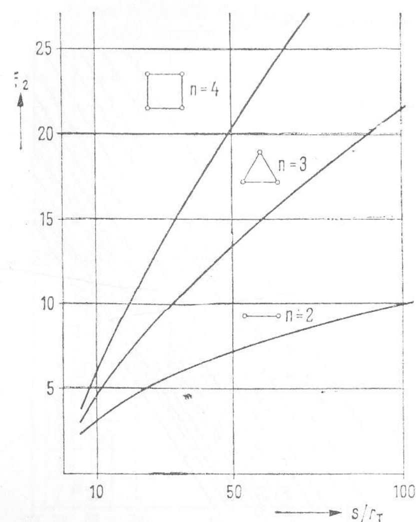


Fig. 8.113. Factorul ξ_2 pentru conductoare fasciculate.

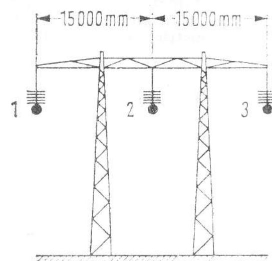


Fig. 8.114. Linie trifazată, cu un singur circuit cu stîlpi portal.

Tabelul 8.74. **Reactanţa inductivă X_L, în Ω/km pe fază, pentru LEA trifazate, cu conductoare fasciculate, la $f = 50$ Hz (valori medii)**

Tensiunea kV	220	380	220	380	220	380
Compunerea conductorului fasciculat $n \times d_T/s$	Configuraţia fazelor					
2 × 21,9/400	0,32	—	0,31	—	0,29	—
2 × 32,4/400	—	0,34	—	0,33	—	0,32
4 × 21,9/400	—	0,30	—	0,29	—	0,27

Linii aeriene cu conductoare tubulare

X_L se calculează din ecuaţiile (8.40) ... (8.42), cu introducerea razei echivalente r' în locul razei conductorului r

$$r' = \xi_3 \cdot r_1, \tag{8.45}$$

unde: ξ_3 este un factor numeric conform fig. 8.115;
r_1 — raza exterioară a conductorului tubular, în mm;
r_2 — raza interioară a conductorului tubular, în mm.

Rezistenţa de scurgere şi descărcări corona R'_a

Scurgerile de curent prin izolaţie spre pămînt şi descărcările corona produc pierderi de energie electrică pe reţea. Rezistenţa efectivă în derivaţie, introdusă în acest scop în schema circuitului echivalent (fig. 8.110) este

$$R'_a = \frac{U^2}{P'_v} \text{ k}\Omega \text{ km pe fază} \tag{8.46}$$

unde: U este tensiunea de lucru, în kV (între faze);
P'_v — pierderea de putere datorită scurgerilor de curent şi descărcărilor corona, în kW/km pe sistem trifazat.

Scurgerile de curent şi fenomenul corona depind în foarte mare măsură de condiţiile atmosferice, astfel încît nu se pot da valori numerice pentru R'_a. Ca medie anuală pentru condiţiile din centrul Europei se pot folosi în scopuri estimative valorile din fig. 8.116, în limitele de dispersiune indicate (în cazurile în care se cere o indicaţie aproximativă). Valorile inferioare se vor folosi pentru LEA la mare altitudine şi în zone cu climă umedă.

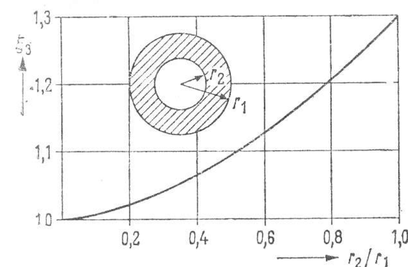


Fig. 8.115. Factorul ξ_3 pentru conductoare fasciculate.

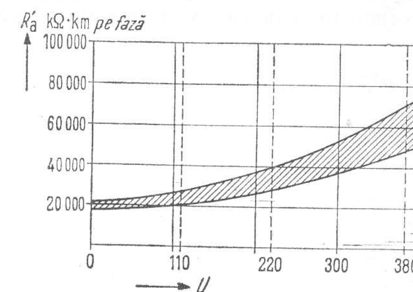


Fig. 8.116. Rezistenţa de scurgere şi de descărcări corona R'_a: U — tensiunea între faze.

Pentru calcule de linii în condiţii normale fenomenul de scurgere şi de descărcări corona se poate neglija, deoarece valoarea rezistenţei R_a este foarte mare în raport cu aceea a celorlalte rezistenţe.

Reactanţa capacitivă X_C

Linii aeriene cu conductoare funie

L i n i i m o n o f a z a t e (două conductoare izolate), linie simplu circuit

$$X_C = \frac{1}{\omega C'} = \frac{1}{\omega\, 2\pi\, \varepsilon_0} \ln \frac{d_{12}}{r} \ [\Omega \text{ km pe fază}]. \tag{8.47}$$

L i n i e t r i f a z a t ă, cu transpunere simetrică:
— linie simplu circuit

$$X_C = \frac{1}{\omega\, 2\pi\, \varepsilon_0} \ln \frac{d_m}{r} \; [\Omega \text{ km pe fază}]; \tag{8.48}$$

— linie cu dublu circuit

$$X_C = \frac{1}{\omega\, 2\pi\, \varepsilon_0} \ln \frac{D_m}{r} \; [\Omega \text{ km pe fază}], \tag{8.49}$$

unde: ω este frecvenţa unghiulară, în s^{-1} ($\omega = 2\pi f = 314\ s^{-1}$; la 50 Hz);
ε_0 — permitivitatea vidului $\varepsilon_0 = 0{,}886 \cdot 10^{-8}$ F/km;
r — raza conductorului, în mm;
d_{12} — distanţa medie din centrul conductorului 1 la centrul conductorului 2, în mm;
d_m, D_m sînt distanţele medii geometrice, în mm, conform ecuaţiilor (8.41 a) şi (8.42 a).

În fig. 8.117 se dau valori medii pentru reactanţa capacitivă X_C, în kΩ km pe fază, la $f = 50$ Hz, în cazul unei linii trifazate cu transpuneri simetrice, simplu circuit, cu conductoare de Ol—Al, în funcţie de distanţa medie geometrică între conductoare d_m.

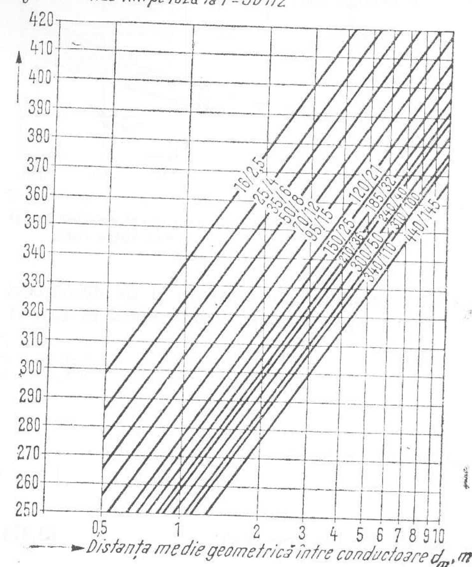


Fig. 8.117. Reactanţa capacitivă X_C pentru o linie trifazată cu transpuneri simetrice, simplu circuit, cu conductoare din Ol-Al: X_C — reactanţa capacitivă, în kΩ km pe fază, la $f = 50$ Hz; d_m — distanţa medie geometrică între conductoare

LEA cu conductoare fasciculate simetrice

X_C se calculează conform ecuaţiilor (8.47 ... 8.49); în locul lui r se introduce raza echivalentă r_e a conductorului fasciculat, luată din ecuaţia (8.44).

Pentru X_C se dau valori medii în tabelul 8.75.

Tabelul 8.75. **Reactanţa capacitivă X_C, în kΩ km pe fază, a conductoarelor trifazate fasciculate, $f = 50$ Hz (valori medii)**

Tensiunea, kV	220	380	220	380	220	380
	Configuraţia fazelor					
Compunerea conductorului fasciculat $n \times d_T/s$						
2 × 21,9/400	280	—	270	—	260	—
2 × 32,4/400	—	300	—	280	—	270
4 × 21,9/400	--	250	—	240	—	230

LEA cu conductoare tubulare

X_C se calculează din ecuaţiile (8.47 ... 8.49); în locul lui r se introduce raza exterioară r_1 a conductorului tubular.

Capacităţi parţiale

Conductoarele unei linii aeriene trifazate au capacităţi parţiale C_e faţă de pămînt şi o capacitate parţială mutuală C_g între conductoare (fig. 8.118).

Pentru o linie cu dublu circuit cu o construcţie simetrică şi cu transpuneri simetrice, cu conductor de protecţie, calculul capacităţilor parţiale este dat în tabelul 8.77

$$C'_e \approx C'_{11} \approx C'_{22} \approx C'_{33} \quad \text{F/km pe fază};$$

$$C'_g \approx C'_{12} \approx C'_{23} \approx C'_{31} \quad \text{F/km}.$$

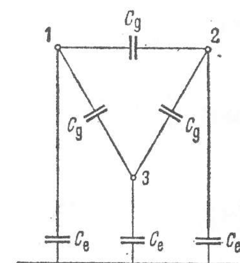


Fig. 8.118. Capacităţile parţiale C_e şi C_g ale unei linii aeriene trifazate.

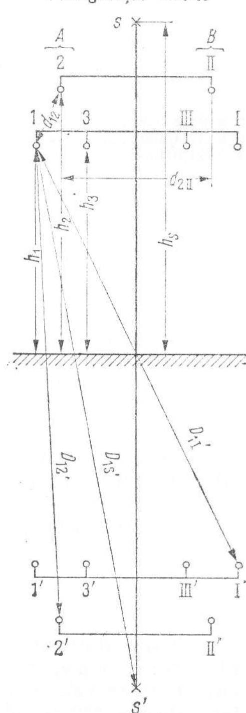
Toate dimensiunile liniare trebuie să fie date în unităţi identice; pentru ε_0 v. pag. 590. Pentru linii trifazate simplu circuit, toate valorile afectate de semnul * în ecuaţii dispar, iar valoarea **2 se înlocuieşte cu 1. În cazul liniilor fără conductor de protecţie toţi termenii cu indicele s dispar (tabelul 8.76).

Capacitatea echivalentă a unui conductor se raportează la capacitățile parțiale cu ajutorul expresiei

$$C_b' = \frac{1}{\omega X_C} = C_e' + 3\,C_g' = \frac{1}{A_{11} - A_{12}}. \tag{8.50}$$

Valorile reduse ale lui C_e sînt valabile în cazul liniilor aeriene fără conductor de protecție, iar valorile mai mari ale lui C_e sînt valabile în cazul liniilor aeriene cu conductor de protecție. Pentru C_g se procedează invers.

Tabelul 8.76. **Calculul capacităților parțiale ale unei linii trifazate cu dublu circuit cu transpuneri simetrice cu conductor de protecție**

		Configurația fazelor
$d_m = \sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}}$	$D_m = \sqrt[3]{D_{12'}D_{23'}D_{31'}}$	 Imaginea în oglindă
$h_m = \sqrt[3]{h_1h_2h_3}$	$^*D_m' = \sqrt[3]{D_{1I'}D_{2II'}D_{3III'}}$	
$^*d_m' = \sqrt[3]{d_{1I}d_{2II}d_{3III}}$	$^*D_m'' = \sqrt[3]{D_{1II'}D_{2III'}D_{3I'}}$	
$^*d_m'' = \sqrt[3]{d_{1II}d_{2III}d_{3I}}$	$D_s = \sqrt[3]{D_{1s'}D_{2s'}D_{3s'}}$	
$d_s = \sqrt[3]{d_{1s}d_{2s}d_{3s}}$		
$a_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{2h_m}{r}$	$a_{12} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_m}{d_m}$	
$^*a_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_m'}{d_m'}$	$^*a\mathrm{III} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_m''}{d_m''}$	
$a_{ss} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{2h_s}{r_s}$	$a_{1s} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_s}{d_s}$	
$A_{11} = a_{11} + {}^*a\pi - {}^{**}2\frac{a_{1s}^2}{a_{ss}}$	$C_e = \frac{1}{A_{11} + 2A_{12}}$	
$A_{12} = a_{12} + a_{1\mathrm{II}}^* - {}^{**}2\frac{a_{1s}^2}{a_{ss}}$	$C_g = \frac{A_{12}}{A_{11} - A_{12}}C_{11}$	

Tabelul 8.77. **Capacitățile parțiale ale liniilor aeriene trifazate cu transpuneri simetrice $f = 50$ Hz (valori medii)**

Configurația fazelor			
C_e	(0,6 ... 0,7) C_b	(0,55...0,60) C_b	(0,50...0,55) C_b
C_g	(0,13...0,10) C_b	(0,15...0,13) C_b	(0,17...0,15) C_b

Impedanța de secvență homopolară Z_0

Impedanța de secvență homopolară înseamnă, pe scurt, impedanța pe fază a sistemului homopolar (fig. 8.119) al unei linii trifazate, în care, prin cele trei conductoare ale fazelor sistemului, circulă curenți egali și în fază. Impedanța de lucru homopolară depinde, printre altele, de conductivitatea electrică a solului și de existența conductoarelor de protecție. În cazul liniilor cu dublu circuit, care au aceeași configurație a conductoarelor de fază, aceeași construcție și sînt parcurse de aceiași curenți, impedanța de secvență homopolară este în mod virtual aceeași pentru ambele circuite.

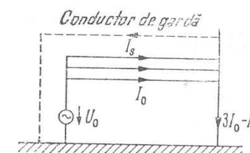


Fig. 8.119. Sistem de curenți de secvență homopolară.

Linii aeriene cu conductoare funie

linie simplu circuit fără conductor de protecție

$$Z_{0E}' = R_0' + \mathrm{j}\,X_0' = \frac{U_0}{I_0}\ [\Omega/\mathrm{km\ pe\ fază}]; \tag{8.51}$$

linie simplu circuit cu conductor de protecție

$$Z_{0Es}' = Z_{0E}' - 3\frac{(Z_{sm}')^2}{Z_s'}\ [\Omega/\mathrm{km\ pe\ fază}]; \tag{8.52}$$

linie cu dublu circuit, fără conductor de protecție

$$Z_{0D}' = Z_{0E}' + 3\,Z_m'\ [\Omega/\mathrm{km\ pe\ fază}]; \tag{8.53}$$

linie cu dublu circuit cu conductor de protecție

$$Z_{0Ds}' = Z_{0D} - 6\frac{(Z_{sm}')^2}{Z_s'}\ [\Omega/\mathrm{km\ pe\ fază}]. \tag{8.54}$$

Rezistenţa de secvenţă homopolară R_0'

$$R_0' = R_e' + 3\,\frac{\pi\mu_0}{4}\,f\,[\Omega/\text{km pe fază}], \tag{8,55}$$

unde: R_e' este rezistenţa, în Ω/km pe fază, conform ecuaţiei (8.39), pag. 585;
μ_0 — permeabilitatea vidului; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ H/km;
f — frecvenţa de lucru, în Hz.

Reactanţa de secvenţă homopolară X_0

$$X_0 = 3\mu_0 f \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{0{,}779\; r\; d_m^2}}\;[\Omega/\text{km pe fază}] \tag{8.56}$$

$$\delta = \frac{1{,}85 \cdot 10^6}{\sqrt{2\pi\, f\, \mu_0\, \varkappa}}\;[\text{mm}], \tag{8.57}$$

unde: δ este adîncimea efectivă de pătrundere a curentului alternativ în pămînt (conform tabelului 8.78);
r — raza conductorului, în mm;
d_m — distanţa medie geometrică între conductoare, în mm, conform ecuaţiei (8.41 a) pag. 586;
$\varkappa$ — conductivitatea electrică a solului, în S/km, (conform tabelului 8.78).

Impedanţa mutuală Z_{sm}' a buclelor conductor de linie-pămînt şi conductor de protecţie

$$Z_{sm}' = \frac{\pi\mu_0 f}{4} + \mathrm{j}\,\mu_0 f \ln \frac{\delta}{d_s}\;[\Omega/\text{km}] \tag{8.58}$$

Cu un conductor de protecţie

$$d_s = \sqrt[3]{d_{1s}\; d_{2s}\; d_{3s}}\ \text{mm}. \tag{8.59}$$

Cu două conductoare de protecţie

$$d_s = \sqrt[6]{d_{1s}\; d_{2s}\; d_{3\bar{s}}\; d_{1\bar{s}}\; d_{2\bar{s}}\; d_{3\bar{s}}}\ \text{mm}. \tag{8.60}$$

Impedanţa Z_s' *a buclei conductor de protecţie-pămînt*

$$Z_s' = \frac{R_{es}'}{a} + \frac{\pi\,\mu_0}{4}\,f + \mathrm{j}\,\mu_0 f\left(\ln\frac{\delta}{r_s'} + \frac{\mu_r}{4a}\right)[\Omega/\text{km}] \tag{8.61}$$

unde: R_{es}' este rezistenţa conductorului de protecţie, în Ω/km;
R_g' — rezistenţa în curent continuu a conductorului de protecţie, în Ω/km.

Rezistenţa R_{es} pentru diferite materiale de execuţie a conductorului de protecţie este:
- Cu, Al, OL-Al (în mai multe straturi) .... $R_{es}' = R_e'$ conform ecuaţiei (8.39)
- Ol—Al (într-un singur strat) .... $R_{es}' \approx (1{,}05 \ldots 1{,}3)\; R_g'$
- sîrmă de oţel .... $R_{es}' \approx (1{,}15 \ldots 1{,}6)\; R_g'$ (în funcţie de structura conductorului şi de intensitatea curentului).

În cazul unui conductor de protecţie $a = 1$; $r_s' = r_s$.

În cazul a două conductoare de protecţie: $a = 2$; $r_s' = \sqrt{r_s d_{s\bar{s}}}$ mm (8.62)

unde: $d_{s\bar{s}}$ este distanţa centrelor între două conductoare de protecţie simetric dispuse, s şi $\bar{s}$, în mm;
μ_r — permeabilitatea relativă a conductorului de protecţie.

Valoarea lui μ_r pentru diferite materiale de execuţie a conductorului de protecţie este:
- Cu, Al, Ol—Al (în mai multe straturi) .... $\mu_r = 1$
- Ol—Al (într-un singur strat) .... $\mu_r \approx 5 \ldots 15$
- sîrmă de oţel: .... $\mu_r \approx 15 \ldots 100$ (în funcţie de structura conductorului şi de intensitatea curentului).

Impedanţa mutuală Z_m' a sistemelor de bucle cu pămîntul A şi B

$$Z_m' = \frac{\pi\,\mu_0}{4}\,f + \mathrm{j}\,\mu_0 f \ln\frac{\delta}{D_{AB}}\;[\Omega/\text{km}]. \tag{8.63}$$

$$D_{AB} = \sqrt[6]{d_{1\mathrm{I}}\, d_{2\mathrm{II}}\; d_{3\mathrm{III}}\; d_{1\mathrm{II}}\; d_{2\mathrm{III}}\; d_{3\mathrm{I}}}\ \text{mm} = \sqrt{d_m' d_m''}\;\;[\text{mm}], \tag{8.64}$$

unde: d_m' şi d_m'' sînt distanţele medii geometrice între conductoare, în mm, conform tabelului 8.72.

Tabelul 8.78. Adîncimea efectivă de pătrundere a curentului alternativ în pămînt, în m

Frecvenţa, Hz	50	500	5000	50	500	5000
Conductivitatea $\varkappa$ a solului, S/km	sol umed 20			sol uscat 2		
Adîncimea de pătrundere δ, m	655	207	65	2070	655	207

Conductivitatea electrică $\varkappa$ a pămîntului depinde în mare măsură de compoziţia şi caracterul solului. Tabelul 8.78 prezintă cifre pentru adîncimea de pătrundere, în m, a curentului alternativ la conductivităţi $\varkappa$ medii şi reduse ale pămîntului.

În tabelul 8.79 se indică valori medii pentru reactanţa homopolară inductivă X_0' a liniilor aeriene trifazate, la 50 Hz, pentru conductivităţi ale solului $\varkappa = 20$ S/km şi

Tabelul 8.79. Reactanţa homopolară inductivă X_0', în Ω/km pe fază, a liniilor aeriene trifazate, $f = 50$ Hz

Tensiunea, kV	110		150		220		380	
	$\varkappa = 20$	$\varkappa = 2$	$\varkappa = 20$	$\varkappa = 2$	$\varkappa = 20$	$\varkappa = 2$	$\varkappa = 20$	$\varkappa = 2$
Linii cu un singur conductor....	X_0', în Ω/km							
Secţiune, mm²								
70	1,40	1,60	—	—	—	—	—	—
95	1,39	1,59	—	—	—	—	—	—
185	1,36	1,55	1,33	1,53	—	—	—	—
300	1,34	1,53	1,31	1,50	1,28	1,48	—	—
340	—	—	—	—	1,25	1,44	—	—
Linii cu conductoare fasciculate $n \times d_T/S$	X_0', în Ω/km							
2 × 21,9/400	—	—	—	—	1,15	1,30	—	—
2 × 32,4/400	—	—	—	—	—	—	1,25	1,45
2 × 21, 9/400.................	—	—	—	—	—	—	1,20	1,40

$\varkappa = 2$ S/km și valori aproximative pentru reducerea reactanței homopolare inductive prin existența conductoarelor de protecție.

Reducerea reactanței de secvență homopolară datorită conductoarelor de protecție este de 0,85...0,95 în cazul conductoarelor de protecție de oțel și de 0,70...0,85 în cazul conductoarelor de protecție de Ol-Al.

Linii aeriene cu conductoare fasciculate sau tubulare simetrice

Valorile corespunzătoare din ecuațiile (8.43) și (8.44) precum și din (8.45) se vor introduce în ecuația (8.56) (v. pag. 594).

Puterea naturală a liniilor trifazate

Puterea naturală P_{nat} în MW se definește prin expresia

$$P_{nat} = \frac{U^2}{Z} \tag{8.65}$$

în care: U este tensiunea de lucru, în kV (între faze);
Z — impedanța caracteristică, în Ω.

Impedanța caracteristică a unei linii fără pierderi este

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{X_L X_C},$$

în care: L este inductanța, în H/km;
C — capacitatea, în F/km.

În tabelul 8.80 sînt date valorile medii ale puterii naturale în cazul liniilor trifazate cu simplu circuit, cu transpuneri simetrice în domeniul tensiunilor normale de transport. În cazul liniilor cu dublu circuit valorile pot fi mai mari, deoarece distanțele între conductoare sînt mai reduse.

Tabelul 8.80. **Puterea naturală P_{nat} a liniilor trifazate simplu circuit (valori medii)**

Tensiunea de lucru kV	Linie cu un conductor singur MW	Linie cu conductoare fasciculate: cu două conductoare MW	Linie cu conductoare fasciculate: cu patru conductoare MW
60	10	—	—
110	33	—	—
150	60	73	85
220	130	160	180
300	240	290	340
380	370	460	540

Limita termică a capacității de transport

Valorile puterii aparente care poate fi transportată timp îndelungat sînt indicate în fig. 8.120 pentru linii aeriene trifazate de înaltă tensiune.

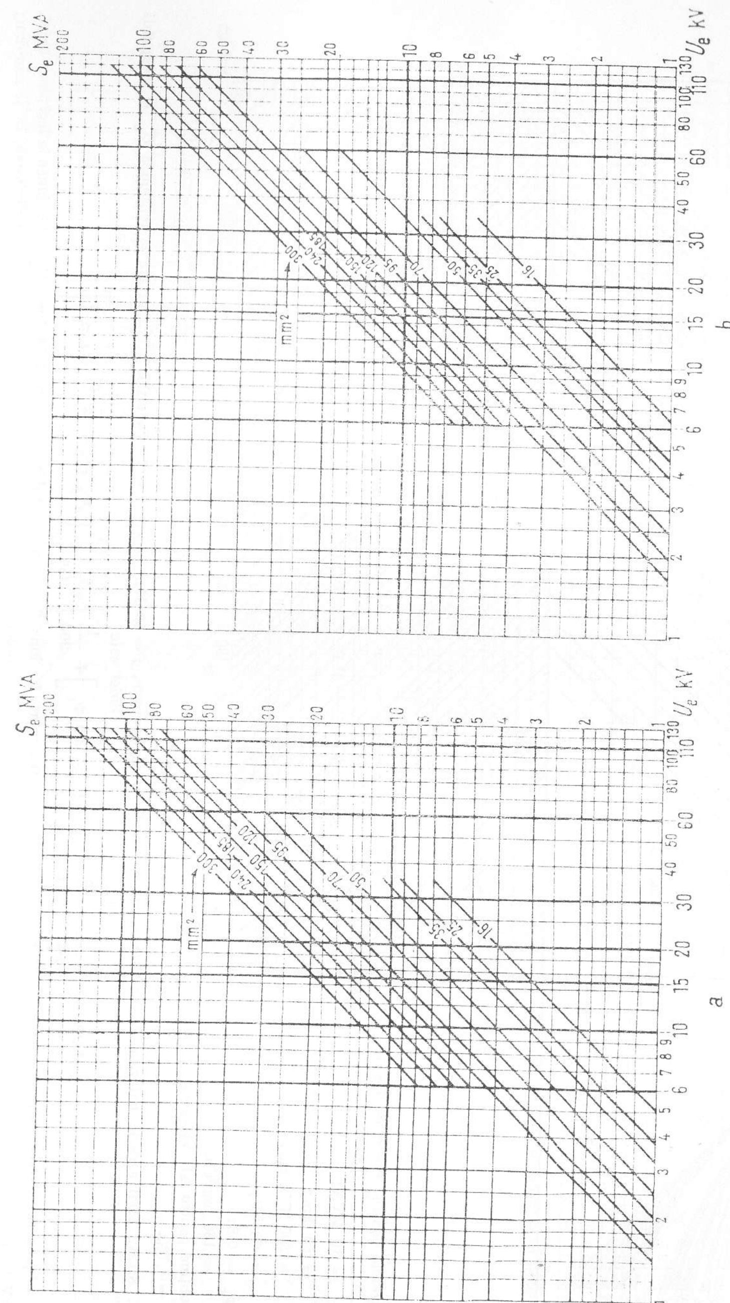
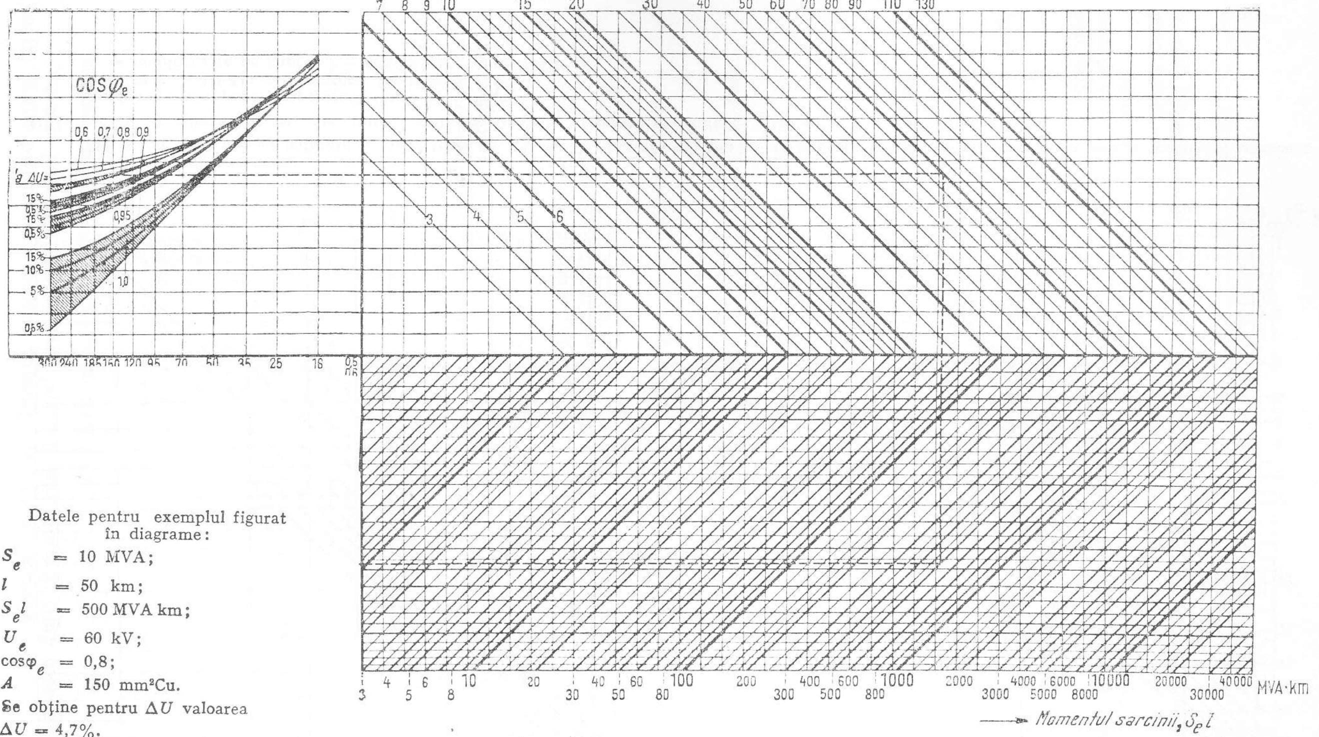


Fig. 8.120. Linii aeriene trifazate de înaltă tensiune: $f \leqslant 60$ Hz; puterea aparentă S_e ce se poate transporta timp îndelungat este în funcție de tensiunea U_e la bornele de alimentare ale liniei (viteza vîntului: 0,6 m/s, temperatura inițială: 35°C).
Conductor de cupru: temperatura finală 70°C.
Conductor de Ol-Al: temperatura finală 80°C.
a — conductoare de cupru; *b* — conductoare din Ol-Al.



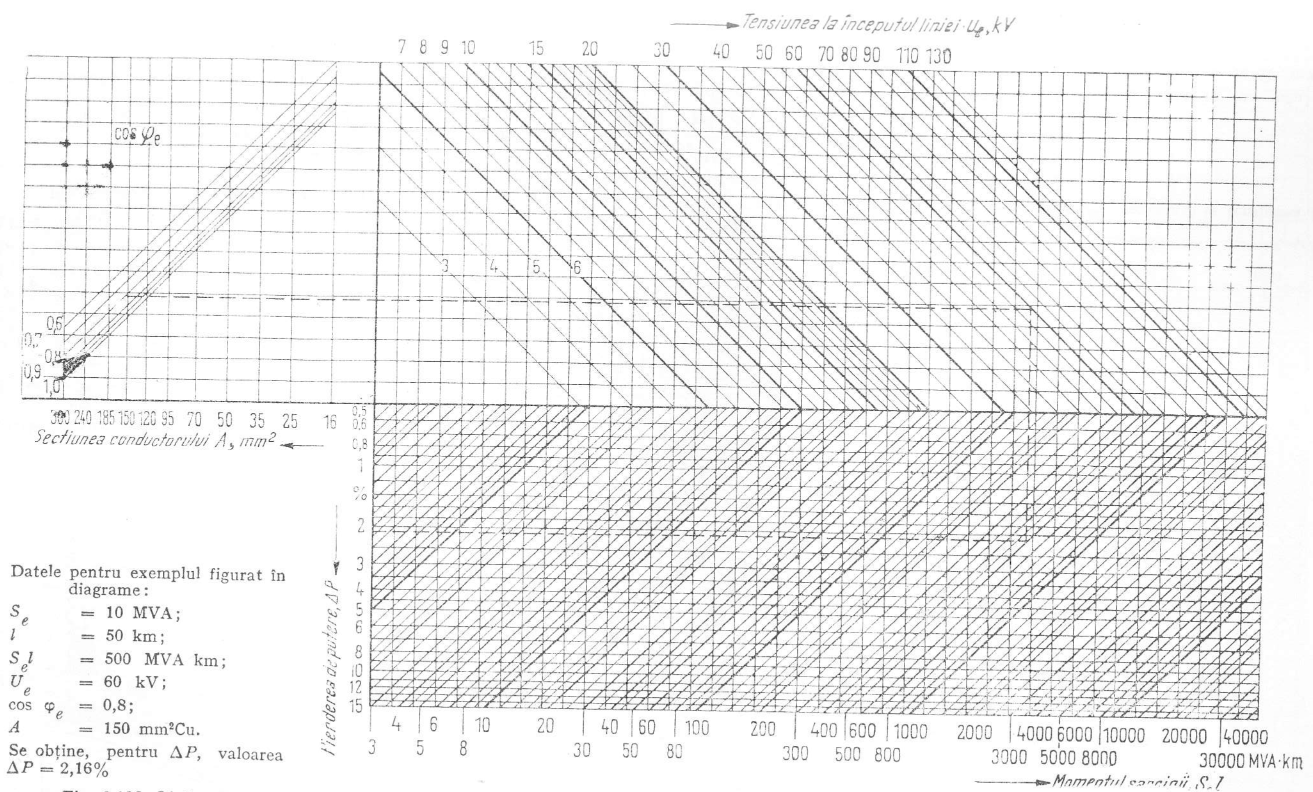
Datele pentru exemplul figurat în diagrame:

S_e = 10 MVA;
l = 50 km;
$S_e l$ = 500 MVA km;
U_e = 60 kV;
cosφ_e = 0,8;
A = 150 mm²Cu.
Se obține pentru ΔU valoarea $\Delta U = 4{,}7\%$.

Fig. 8.121. Linii aeriene trifazate de înaltă tensiune cu conductoare de cupru, $f = 50$ Hz. Căderea de tensiune $\Delta U\%$, raportată la tensiunea U_e la începutul liniei este

$$\Delta U\% = \frac{S_e l\, 100}{U_e^2}\left[\frac{\rho}{A}\cos\varphi_e + X_L \sin\varphi_e\right] + \frac{1}{200}\left[\frac{S_e l\, 100}{U_e^2}\left(X_L\cos\varphi_e - \frac{\rho}{A}\sin\varphi_e\right)\right]^2$$

S_e — puterea aparentă transportată, în MVA; l — distanța de transport, în km; $S_e l$ — momentul sarcinii, în MVA km; U_e — tensiunea la începutul liniei, în kV (între faze); cos φ_e — factorul de putere al puterii aparente la începutul liniei; A — secțiunea conductorului, în mm²; ρ — rezistivitatea, în Ω mm²/km; X_L — reactanța inductivă, în Ω/km.



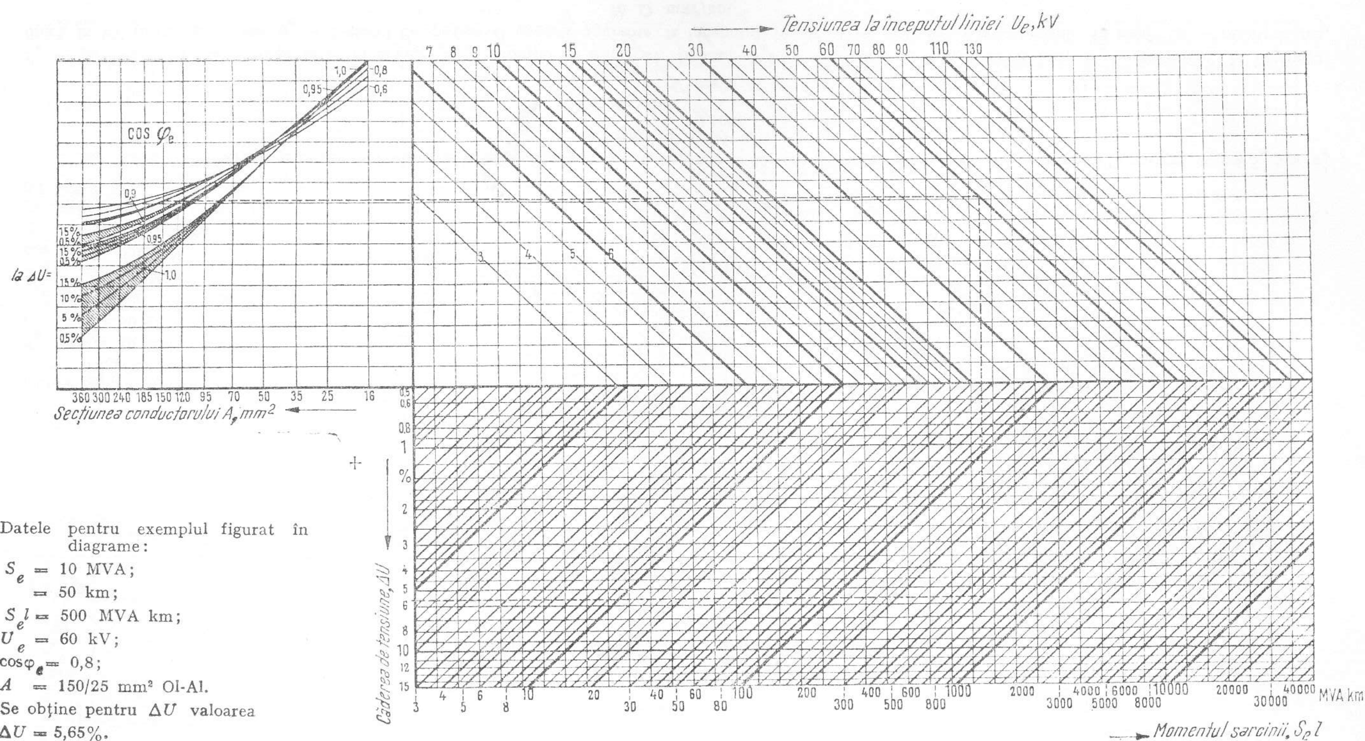
Datele pentru exemplul figurat în diagrame:

S_e = 10 MVA;
l = 50 km;
$S_e l$ = 500 MVA km;
U_e = 60 kV;
cos φ_e = 0,8;
A = 150 mm²Cu.
Se obține, pentru ΔP, valoarea $\Delta P = 2{,}16\%$

Fig. 8.122. Linii aeriene trifazate de înaltă tensiune, cu conductoare de cupru, $f = 50$ Hz. Pierderea de putere $\Delta P\%$, raportată la puterea activă $S_e \cos\varphi_e$ la începutul liniei este

$$\Delta P\% = \frac{S_e l\, 100 \rho}{U^2 \cos\varphi_e A}$$

S_e — puterea aparentă transportată, în MVA; l — distanța de transport, în km; $S_e l$ — momentul sarcinii, în MVA km; U_e — tensiunea la începutul liniei, în kV (între faze); cos φ_e — factorul de putere al puterii aparente la începutul liniei; A — secțiunea conductorului, în mm²; ρ — rezistivitatea, în Ω mm²/km.



Datele pentru exemplul figurat în diagrame:

S_e = 10 MVA;

= 50 km;

$S_e l$ = 500 MVA km;

U_e = 60 kV;

$\cos\varphi_e$ = 0,8;

A = 150/25 mm² Ol-Al.

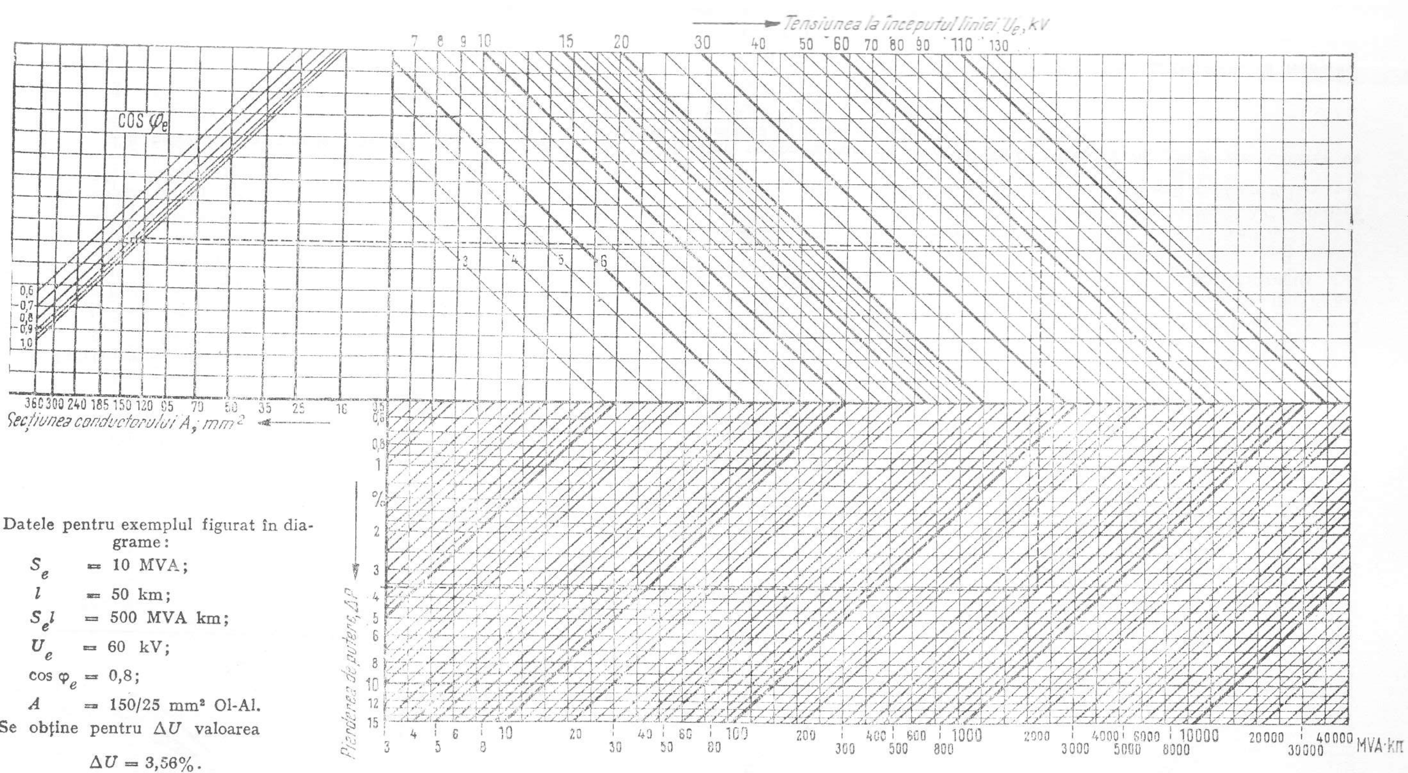
Se obține pentru ΔU valoarea

ΔU = 5,65%.

Fig. 8.123. Linii aeriene trifazate de înaltă tensiune cu conductoare de aluminiu sau Ol-Al, $f = 50$ Hz. Căderea de tensiune $\Delta U\%$ raportată la tensiunea U_e la începutul liniei este

$$\Delta U\% = \frac{S_e l\,100}{U_e^2}\left[\frac{\rho}{A}\cos\varphi_e + X_L \sin\varphi_e\right] + \frac{1}{200}\left[\frac{S_e l 100}{U_e^2}\left(X_L\cos\varphi_e - \frac{\rho}{A}\sin\varphi_e\right)\right]^2$$

S_e – puterea aparentă transportată, în MVA; l – distanța de transport, în km; $S_e l$ – momentul sarcinii, în MVA km; U_e – tensiunea la începutul liniei în kV (între faze); $\cos\varphi_e$ – factorul de putere al puterii aparente la începutul liniei; A – secțiunea conductorului, în mm²; ρ – rezistivitatea, în Ω mm²/km; X_L – reactanța inductivă, în Ω/km.



Datele pentru exemplul figurat în diagrame:

S_e = 10 MVA;

l = 50 km;

$S_e l$ = 500 MVA km;

U_e = 60 kV;

$\cos\varphi_e$ = 0,8;

A = 150/25 mm² Ol-Al.

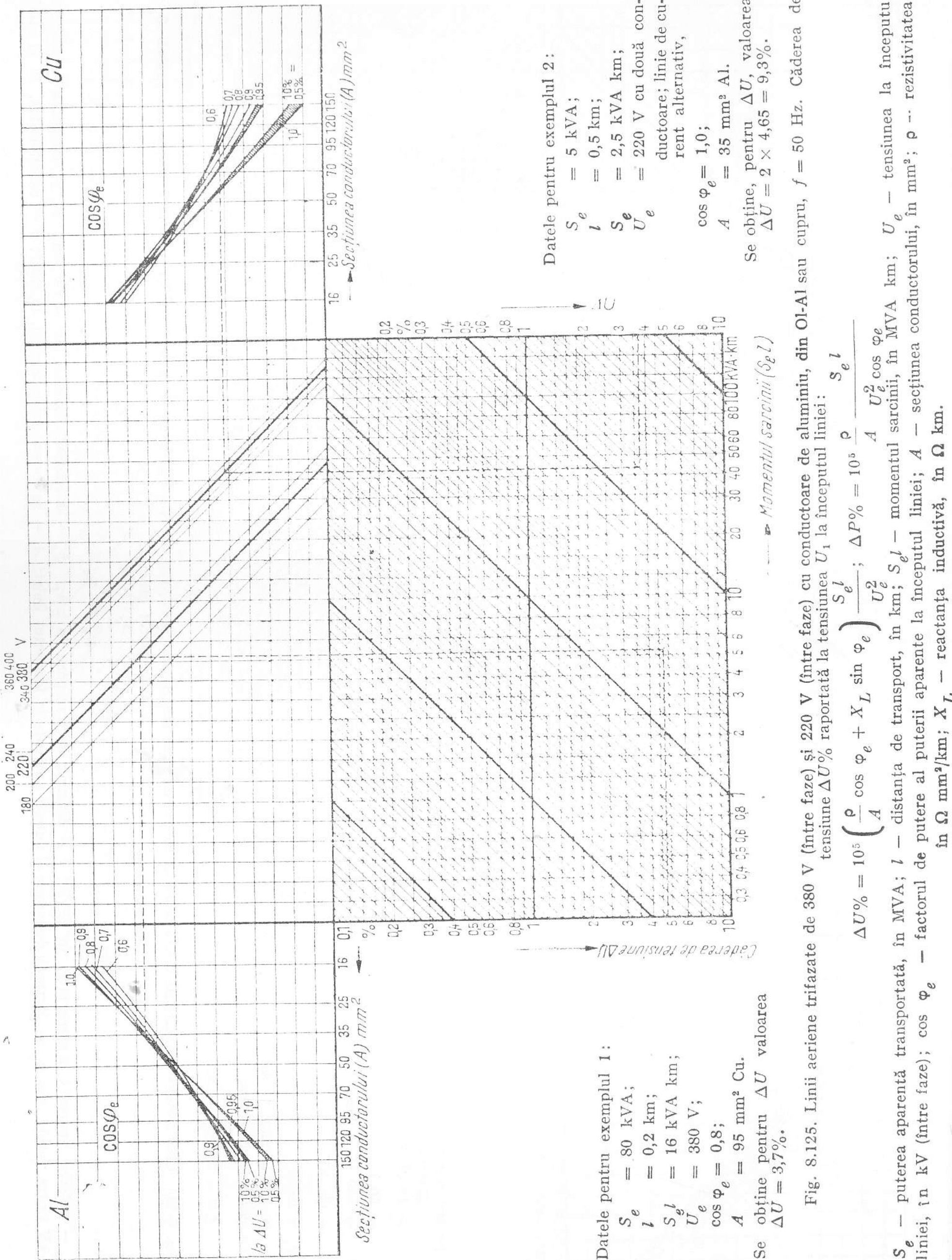
Se obține pentru ΔU valoarea

ΔU = 3,56%.

Fig. 8.124. Linii aeriene trifazate de înaltă tensiune cu conductoare din Al sau Ol-Al, $f = 50$ Hz. Pierderea de putere $\Delta P\%$, raportată la puterea activă $S_e \cos\varphi_e$ la începutul liniei

$$\Delta P\% = \frac{S_e l\,100\rho}{U_e^2 \cos\varphi_e A}$$

S_e – puterea aparentă transportată, în MVA; l – distanța de transport, în km; $S_e l$ – momentul sarcinii, în MVA km; U_e – tensiunea la începutul liniei, în kV (între faze); $\cos\varphi_e$ – factorul de putere al puterii aparente la începutul liniei; A – secțiunea conductorului, în mm²; ρ – rezistivitatea, în Ω mm²/km.



Datele pentru exemplul 1:
S_e = 80 kVA;
l = 0,2 km;
$S_e l$ = 16 kVA km;
U_e = 380 V;
$\cos \varphi_e$ = 0,8;
A = 95 mm² Cu.
Se obține pentru ΔU valoarea ΔU = 3,7%.

Datele pentru exemplul 2:
S_e = 5 kVA;
l = 0,5 km;
S_e = 2,5 kVA km;
U_e = 220 V cu două conductoare; linie de curent alternativ,
$\cos \varphi_e$ = 1,0;
A = 35 mm² Al.
Se obține, pentru ΔU, valoarea $\Delta U = 2 \times 4{,}65 = 9{,}3\%$.

Fig. 8.125. Linii aeriene trifazate de 380 V (între faze) și 220 V (între faze) cu conductoare de aluminiu, din Ol-Al sau cupru, f = 50 Hz. Căderea de tensiune $\Delta U\%$ raportată la tensiunea U_1 la începutul liniei:

$$\Delta U\% = 10^5 \left(\frac{\rho}{A} \cos \varphi_e + X_L \sin \varphi_e \right) \frac{S_e l}{U_e^2}; \quad \Delta P\% = 10^5 \frac{\rho}{A} \frac{S_e l}{U_e^2 \cos \varphi_e}$$

S_e — puterea aparentă transportată, în MVA; l — distanța de transport, în km; $S_e l$ — momentul sarcinii, în MVA km; U_e — tensiunea la începutul liniei, în kV (între faze); $\cos \varphi_e$ — factorul de putere al puterii aparente la începutul liniei; A — secțiunea conductorului, în mm²; ρ — rezistivitatea în Ω mm²/km; X_L — reactanța inductivă, în Ω km.

Căderile de tensiune ΔU și pierderile de putere ΔP

Linie aeriană fără derivații

Căderile de tensiune și pierderile de putere la capătul liniilor aeriene în sarcină sînt indicate în fig. 8.121 ... 8.125 de la p. 598 ... 602. Formulele de calcul sînt date în diagrame.

Linie aeriană cu derivații

Căderile de tensiune și pierderile de putere pe liniile aeriene cu derivații se pot obține tratînd porțiunile individuale de transport ca unități separate. O metodă exactă pentru determinarea lor este dată la pag. 402, în tabelul 8.1.

8.9. INSTALAȚII ELECTRICE

Tabelul 8.81. **Calculul căderii de tensiune și al secțiunii**

Legea lui Ohm	$U = RI$
Puterea în c.c.	$P = UI$
Randamentul	$\eta = \frac{P_u}{P_a}$
Puterea activă în c.a. monofazat	$P = UI \cos \varphi$
Puterea activă în c.a. trifazat..........	$P = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi$
Rezistența conductorului..........	$R = \frac{l}{\gamma A}$

Felul curentului	Căderea de tensiune, V	Secțiunea mm²
Cînd se cunoaște curentul I		
c.c.	$\Delta U = \frac{2 lI}{\gamma A}$	$A = \frac{2 lI}{\gamma \Delta U}$
c.a. monofazat	$\Delta U = \frac{2 lI}{\gamma A} \cos \varphi$	$A = \frac{2 lI}{\gamma \Delta U} \cos \varphi$
c.a. trifazat	$\Delta U = \frac{\sqrt{3}\, lI}{\gamma A} \cos \varphi$	$A = \frac{\sqrt{3}\, lI}{\gamma \Delta U} \cos \varphi$
Cînd se cunoaște puterea P		
c.a. monofazat și c.c.	$\Delta U = \frac{2 lP}{\gamma A U}$	$A = \frac{2 lP}{\gamma \Delta U\, U}$
c.a. trifazat	$\Delta U = \frac{lP}{\gamma A U}$	$A = \frac{lP}{\gamma \Delta U\, U}$

Observații: 1. Relațiile din tabel sînt valabile pentru coloane și circuite de joasă tensiune cu conductoare izolate protejate în tuburi și pentru cabluri, neglijînd inductanța.

2. Semnificația simbolurilor din tabel: U — tensiunea de lucru, în V; ΔU — căderea de tensiune, în V; R — rezistența, în Ω; I — curentul, în A; P — puterea activă, în W; l — lungimea simplă a conductorului, în m; A — secțiunea conductorului, în mm²; γ — conductivitatea, în Sm/mm²; η — randamentul; P_u — puterea utilă, în W; P_a — puterea absorbită, în W; $\cos \varphi$ — factorul de putere.

3. Valorile pentru conductivitate sînt date în tabelele 2.21 și 2.22, iar valorile puterilor uzuale pentru aparatele electrocasnice, în tabelele 13.28 și 13.29.

Conductoare izolate pentru curenţi tari

Prescripţii. Pentru circuitele electrice se admit numai acele tipuri de conductoare, care corespund prescripţiilor respective din diferite ţări. În aceste prescripţii, în mod obişnuit, sînt specificate conductoarele pentru curenţi tari, utilizate în instalaţii fixe şi pentru racordarea receptoarelor mobile.

Fire indicatoare. În conformitate cu normele germane se admite ca conductoarele să aibă un fir indicator al încercării de tip. De asemenea ele trebue să conţină un „fir indicator al firmei", care, în cazul întreprinderilor Siemens, au succesiunea de culori: verde — alb — roşu — alb.

La conductoarele cu înveliş izolant din material sintetic termo-plastic în locul firelor indicatoare sau pe lîngă acestea se foloseşte pentru identificare marcarea sau imprimarea continuă pe înveliş.

Tensiunea nominală este valoarea efectivă a tensiunii sinusoidale, aplicate între conductoarele a două faze, în curent alternativ, sau între conductoarele de lucru, în curent continuu, pentru care s-a prevăzut izolaţia conductorului respectiv şi care defineşte acest conductor.

Tensiunea de lucru este tensiunea care există în orice moment între conductoarele unui circuit.

Obişnuit tensiunea admisibilă poate depăşi tensiune nominală a conductoarelor cu pînă la 15%. De aceea conductoarele se pot folosi:

1) În instalaţii de curent trifazat a căror tensine de lucru (în triunghi) nu este mai mare de 1,15 ori tensiunea nominală a conductorului.

2) În instalaţii de curent monofazat şi de curent continuu a căror tensiune de lucru nu este mai mare de 1,15 ori tensiunea nominală a conductorului.

3) În instalaţii de curent monofazat şi de curent continuu cu un pol legat la pămînt a căror tensiune de lucru nu depăşeşte de $1{,}15/\sqrt{3} = 0{,}66$ ori tensiunea nominală a conductorului.

Excepţiile se specifică de la caz la caz.

Sarcina. Pentru capacitatea de încărcare a conductoarelor şi pentru protecţia lor electrică sînt valabile tabelele 8.82 ... 8.84.

Încărcarea conductoarelor izolate în regim permanent este arătată în tabelul 8.82. Valorile încărcărilor date în acest tabel asigură încălzirea conductoarelor în limitele admisibile şi anume (inclusiv temperatura mediului ambiant):

— pînă la +60°C, pentru conductoare cu izolaţie din cauciuc;

— pînă la +65°C, pentru conductoare cu izolaţie din materiale sintetice termoplastice.

Valorile date în tabel au un coeficient de siguranţă, pentru a permite montarea grupată a numărului de conductoare indicat; în cazul cînd este necesară o dimensionare mai precisă a secţiunii conductoarelor funcţie de încălzirea admisibilă, se vor folosi indicaţiile fabricii constructoare sau ale normativelor de specialitate. De asemenea, în cazul conductoarelor îngrămădite sau în colaci, sarcina admisibilă se va calcula de la caz la caz. În regim de lucru intermitent, cu durata totală a ciclului de minimum 10 min. din care 4 min. de funcţionare, încărcarea admisibilă pentru conductoare de cupru cu secţiunea peste 10 mm² şi pentru conductoare de aluminiu cu secţiunea peste 16 mm² se determină prin înmulţirea valorii încărcării maxime admisibile în regim permanent indicate în tabele cu coeficientul

$$a = \frac{0{,}875}{\sqrt{DC}}$$

unde DC este durata relativă de conectare, definită prin raportul dintre timpul de funcţionare şi durata totală a ciclului; pentru conductoarele cu secţiuni mai mici, încărcările admisibile sînt cele din regim permanent.

În cazul cînd există posibilitatea unei încărcări de lungă durată a conductoarelor peste valorile menţionate mai sus, trebuie să se aleagă pentru protecţie un curent reglat la o valoare mai mică.

Tabelul 8.82. Sarcina maximă admisibilă în A, în regim permanent de funcţionare a conductoarelor izolate la temperaturi ale mediului ambiant de + 25 °C

Secţiune nominală	Categoria I: 2, 3, 4 conductoare în tuburi sau sub tencuială		Categoria II: cordoane multifilare pentru receptoare mobile		Categoria III: conducte unifilare pentru instalaţii în aer	
mm²	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
0,5	—	—	12	—	—	—
0,75	—	—	14	—	13	—
1	14	—	16	—	15	—
1,5	16	—	20	—	20	—
2,5	25	19	28	—	27	18
4	30	23	36	—	36	25
6	40	30	45	—	47	35
10	50	39	60	—	65	48
16	75	55	80	—	87	64
25	90	70	105	—	115	90
35	115	85	130	—	143	110
50	150	120	160	—	173	135
70	185	140	200	—	220	170
95	225	175	—	—	265	200
120	260	200	—	—	310	235
150	—	—	—	—	370	300

Observaţie. În cazul unor temperaturi ale mediului ambiant diferite de + 25°C, sarcina admisibilă în regim permanent se va corecta corespunzător, conform indicaţiilor din tabelul 8.83.

Tabelul 8.83. Sarcina admisibilă în regim permanent a conductoarelor izolate, la diferite temperaturi ale mediului ambiant, în % din valorile date în tabelul 8.82

Temperatura, °C	+ 5	+ 10	+ 15	+ 20	+ 25	+ 30	+ 35	+ 40
Sarcina, %	122	117	112	106	100	94	87	79

Tabelul 8.84. **Protecția conductoarelor izolate prin siguranțe fuzibile și relee, funcție de secțiunea lor nominală**

Secțiunea conductorului de cupru mm²	Curentul nominal al protecției, A											
	Categoria I				Categoria II				Categoria III			
	Lumină	Forță			Lumină	Forță			Lumină	Forță		
		Siguranțe	Relee			Siguranțe	Relee			Siguranțe	Relee	
			EM	T			EM	T			EM	T
0,5	—	—	—	—	6	25	50	15	—	—	—	—
0,75	—	—	—	—	10	35	60	20	10	35	60	20
1	10	35	60	20	10	50	80	25	10	35	70	25
1,5	10	50	80	25	16	63	100	32	16	50	80	32
2,5	16	63	100	40	20	80	125	40	20	80	125	40
4	20	80	125	40	25	100	160	40	25	100	160	60
6	25	100	160	60	35	125	200	60	35	125	200	80
10	35	125	200	80	50	160	270	80	50	160	270	100
16	50	200	315	100	63	200	315	100	63	250	400	125
25	63	250	400	125	80	250	400	125	80	315	500	160
35	80	315	500	160	100	315	500	160	100	400	600	200
50	100	400	600	200	125	400	600	200	125	500	800	250
70	125	500	800	250	160	500	800	315	160	630	1000	315
95	160	630	1000	315	—	—	—	—	200	—	1150	400
120	200	—	1200	400	—	—	—	—	250	—	1400	500
150	—	—	—	—	—	—	—	—	345	—	1650	600

Observații.

1. La temperaturi ale mediului ambiant diferite de + 25 °C, curentul nominal al protecției trebuie corectat conform indicațiilor din tabelul 8.83; se va alege valoarea curentului nominal al protecției imediat inferioară valorii calculate.
2. În cazul folosirii conductoarelor din aluminiu, valoarea curentului nominal al protecției se va alege cu o treaptă de reglaj mai jos decît valorile date în tabel pentru aceeași secțiune a conductorului (v. fig. 8.126, *a* și *b*).

Tabelul 8.85. **Secțiuni minime în folosirea conductoarelor**

Destinația conductorului	Secțiune minimă, mm²	
	Cu	Al
Circuite de forță și lumină protejate în tuburi, inclusiv derivațiile la un singur loc de lampă și circuitele prizelor din apartamente	1,5	2,5
În interiorul corpului de iluminat	0,75	—
La instalații aeriene interioare cu distanța între izolatoare:		
— între 1 și 2 m	1,5	4
— peste 2 m, pînă la 6 m	2,5	6
— peste 6 m, pînă la 15 m	4	10
— peste 15 m	6	16
Circuite primare pentru alimentarea firmelor cu gaze rarefiate	2,5	4
Coloanele dintre tabloul principal și tablouri secundare	2,5	4
Legătura dintre contor și tabloul de distribuție din locuințe:		
— peste 220 V	4	6
— sub 120 V	10	16
Pentru instalațiile mononul:		
— conductoarele de fază (lumină și prize)	1,5	2,5
— conductorul de nul (comun)	2,5	2,5
— între contor și tabloul de distribuție	2,5	4
Circuitele secundare ale reductoarelor de curent	2,5	

Tabelul 8.85 (continuare)

Destinația conductorului	Secțiune minimă, mm²	
	Cu	Al
Legăturile în interiorul tablourilor de distribuție și automatizare:		
— legături lipite	1	—
— legături cu cleme sau borne	1,5	2,5
Pentru racordarea receptoarelor mobile, pentru un curent:		
— pînă la 6 A	0,75	—
— peste 6 A, pînă la 10 A	1	—
— peste 10 A, pînă la 16 A	1,5	—
— peste 16 A, pînă la 25 A	2,5	—
— peste 25 A, pînă la 31,5 A	4	—
— peste 31,5 A, pînă la 40 A	6	—
— peste 40 A, pînă la 63 A	10	—
Pentru racordarea corpurilor de iluminat portative, pentru un curent:		
— pînă la 4 A	0,5	—
— peste 4 A, pînă la 10 A	0,75	—
Conductorul de nul:		
a) în circuite monofazate	ca și conductorul de fază	
b) în circuitele trifazate:		
— pînă la secțiunea de 16 mm²	idem	
— pentru secțiunile de 25 mm² și 35 mm²	16	16
— pentru secțiunea de 50 mm²	25	25
— pentru secțiunea de 70 mm²	35	35
— pentru secțiunea de 95 mm²	50	50
— pentru secțiunile de 120 mm² și 150 mm²	70	70
— pentru secțiunea de 185 mm²	95	95
— pentru secțiunea de 240 mm²	120	120

Protecția circuitelor

Siguranțe. Siguranțele trebuiesc montate pe traseul conductoarelor în acele puncte unde sînt absolut necesare, ținînd seama de încărcările admisibile; de exemplu:

— la intrarea în tablourile de distribuție cu peste 5 circuite, alimentate direct din rețeaua publică, sau cu puteri instalate de peste 8 kW, alimentate prin coloane magistrale;

— la plecările coloanelor și circuitelor din tablouri;

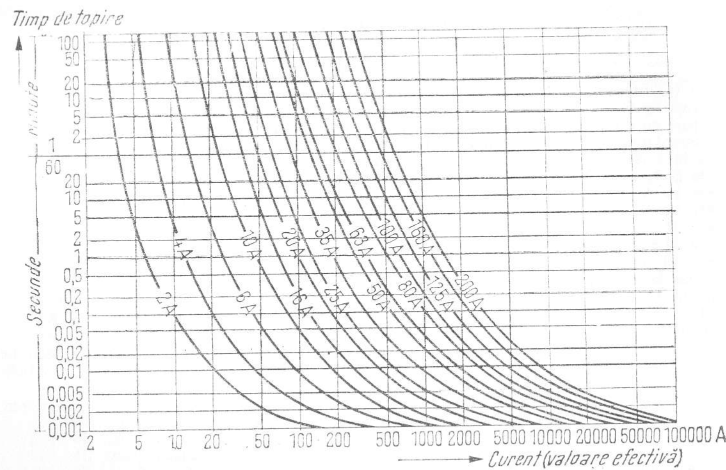
— pe derivații, în punctele de derivație sau la maximum 5 m de ele, dacă secțiunea conductoarelor derivației este mai mică și nu este satisfăcută de siguranțele circuitului sau coloanei magistrale; cînd punctul de derivație este greu accesibil, siguranțele se pot monta convenabil, la distanțe de maximum 30 m de acesta, cu condiția ca secțiunea conductoarelor derivației să aibă o capacitate de transport de minimum 10% din a coloanei magistrale.

Fuzibilele siguranțelor. Dependența timpului de topire a fuzibilelor siguranțelor de intensitatea curentului care le străbate este concretizată prin curbele curent-timp. După aceste curbe siguranțele fuzibile pot fi:

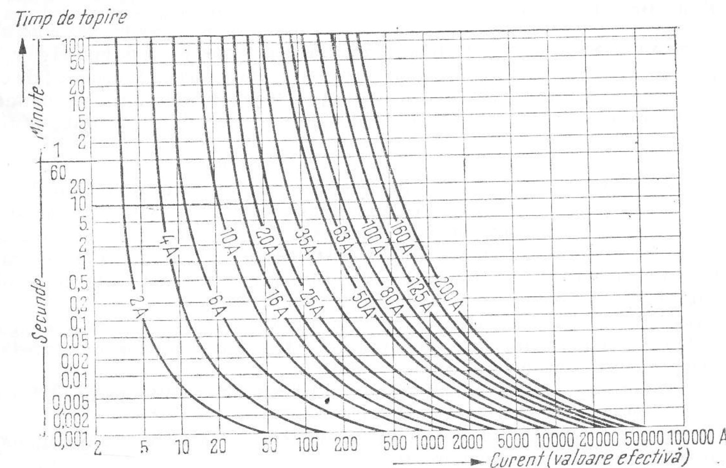
— cu acțiune rapidă, folosite pentru limitarea la minimum posibil a efectelor termice și dinamice ale curenților de scurtcircuit;

— cu acțiune lentă, folosite pentru a suporta curentul de pornire al motoarelor asincrone cu rotorul în scurtcircuit.

În fig. 8.126 s-au reprezentat curbele timp-curent pentru siguranțele fuzibile Siemens-Original DIAZET. Aceste curbe indică caracteristicile medii de funcționare, domeniul lor de folosire lărgindu-se într-o plajă de ± 5% față de valorile date în diagramă.



a



b

Fig. 8.126. Caracteristicile curent mediu-timp, pentru siguranțele Siemens-Original DIAZET: *a* — cu acțiune rapidă; *b* — cu acțiune lentă.

Întreruptoare pentru protecția liniilor (PL). Întreruptoarele pentru protecția liniilor sînt prevăzute cu relee termice (temporizate) și cu relee electromagnetice (instantanee). În acest mod se obține stabilitatea curentului în zone de suprasarcină (prin releele termice) și declanșarea rapidă în caz de scurtcircuit (prin releele electromagnetice).

Caracteristicile întreruptoarelor pentru protecția liniilor (PL) sînt superioare celor ale siguranțelor fuzibile, permițînd o mai bună utilizare a secțiunii conductoarelor (fig. 8.127).

Contactoarele cu relee românești DITU sau AC-3 nu sînt prevăzute cu relee electromagnetice; de aceea, în cazul folosirii lor protecția la scurtcircuit urmează să fie realizată prin siguranțe fuzibile montate în amonte.

Selectivitatea. În cazul în care între sursa de alimentare și locul unde s-a produs un defect există înseriate mai multe protecții, va trebui să funcționeze protecția cea mai apropiată de defect, pentru izolarea acestuia și lăsarea în stare de funcționare a restului rețelei. Aceasta se realizează dacă caracteristicile curent-timp ale siguranțelor și ale întreruptoarelor PL legate în serie nu se întrepătrund. De aceea, la proiectarea protecției liniilor va trebui să se țină seamă de următoarele reguli:

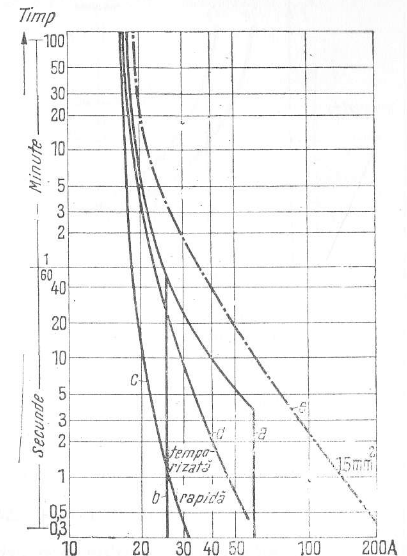


Fig. 8.127. Compararea caracteristicilor curent-timp: *a* — caracteristica medie curent-timp pentru un întreruptor PL tip L 10 A; *b* — caracteristica medie curent-timp pentru un întreruptor PL tip H 10 A; *c* — caracteristica medie curent-timp pentru o siguranță cu topire rapidă de 10 A; *d* — caracteristica medie curent-timp pentru o siguranță cu topire lentă de 10 A; *e* — curentul nominal al unui conductor de cupru de 1,5 mm².

1) În cazul folosirii siguranțelor rapide curenții nominali se eșalonează din două în două trepte. Pentru siguranțele Siemens—Original DIAZET selectivitatea se poate obține eșalonîndu-se curentul nominal la o singură treaptă.

2) Siguranțele cu topire lentă se pot eșalona la o singură treaptă de curent.

3) Nu se vor introduce siguranțe cu topire rapidă înaintea siguranțelor cu topire lentă în sensul circulației de energie; se pot însă introduce siguranțe cu topire lentă înaintea siguranțelor cu topire rapidă.

4) La legarea în serie a siguranțelor cu topire lentă și a întreruptoarelor PL se va ține seama ca siguranțele dinaintea întreruptorului să aibă curentul nominal mai mare cu cel puțin două trepte, pentru curenți de scurtcircuit de valoare probabilă pînă la 500 A și de cel puțin trei trepte, pentru curenți de scurtcircuit mai mari de 500 A. Indicațiile asupra comportării selective a siguranțelor și întreruptoarelor PL sînt date de valorile termice care determină timpul de topire al fuzibilelor și de timpii de întrerupere ai întreruptoarelor.

Pentru înlăturarea posibilității deteriorării întreruptoarelor automate pentru protecția liniilor în cazul depășirii puterii de rupere nominale, se vor monta în amonte

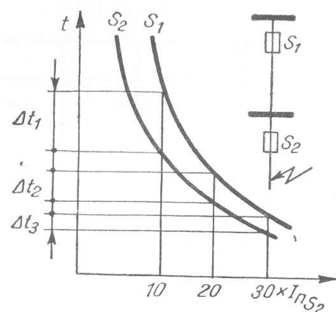


Fig. 8.128. Determinarea grafică a selectivității protecției liniilor.

siguranțe fuzibile cu topire lentă corespunzătoare. Pentru întreruptoarele cu curentul nominal pînă la 100 A, această prevedere este obligatorie.

5) Asigurarea selectivității prin întreruptoare PL nu este posibilă, deoarece, chiar dacă există o eșalonare a curenților nominali, în cazul unui scurtcircuit releele cu declanșare rapidă pot funcționa simultan.

Se menționează că problema selectivității protecției devine mai complicată cînd siguranțele sînt de fabricație diferită, deoarece caracteristicile timp-curent se pot intersecta. În aceste cazuri aprecierea selectivității se va face trasînd curbele siguranțelor care îmbracă plaja valorilor curenților de protecție (exemplu fig. 8.128) și alegîndu-le pe acelea care:

— nu se intersectează sau se intersectează pentru valori ale curentului mai mari decît cele ale curentului de scurtcircuit la locul instalării siguranței;

— au diferențele de timp, măsurate pe diagramă, corespunzătoare treptelor de curent de 10, 20, 30 ori curentul nominal al siguranței, respectiv de:

$$\Delta t_1 \geqslant 1 \text{ s}; \quad \Delta t_2 \geqslant 0,5 \text{ s}; \quad \Delta t_3 \geqslant 0,02 \text{ s}.$$

La siguranțele rapide și pentru curenți nominali mici se admit și valori mai reduse ale treptelor de timp.

Tuburi și țevi de protecție

Tuburi izolante metalice. Sînt confecționate dintr-o manta din tablă de oțel, plumbuită sau lăcuită pe ambele părți, care îmbracă un tub de carton impregnat. Se utilizează în montaj aparent sau îngropat (IP, IPF, IPFR, IPE).

Tuburi izolante din PVC. Se folosesc pentru montaj aparent sau îngropat, în anumite condiții de temperatură (IPY, IPFY, IPEY).

Tuburi sau țevi de oțel fără înveliș izolant. Pot fi filetate sau nu; se folosesc în montaj aparent sau îngropat (PEL, T)

Țeavă din PVC dur filetată la capete. Se folosește de asemenea în montaj aparent sau îngropat, în anumite condiții de temperatură și în locuri ferite de deteriorări mecanice (U).

Alegerea tipului de tub se face funcție de caracteristicile mediului ambiant și de protecția mecanică cerută de locul de pozare, iar a diametrului tubului, funcție de numărul și de secțiunea conductoarelor care se protejează, conform indicațiilor din tabelul 8.86 și 8.87.

Domenii de utilizare a conductoarelor izolate

Alegerea corectă a tipului de conductor funcție de destinația instalației și de locul de pozare se face ținînd seama de diverse prescripții. În tabelele 8.88...8.90 se dau indicații generale asupra domeniilor de utilizare a conductoarelor izolate folosite obișnuit în R. S. R.

Tabelul 8.86. Diametrul interior minim al tuburilor și țevilor pentru protecția conductoarelor F, AF, FY, AFY

Secțiunea conductorului mm²				
	Diametrul interior minim necesar, mm²			
1	11	11	13,5	16
1,5	11	13,5	13,5	16
2,5	11	13,5	16	21
4	13,5	16	21	21
6	13,5	21	21	21
10	13,5	21	21	29
16	16	29	29	29
25	21	29	36	36
35	21	36	36	36
50	21	36	42	50
70	29	42	50	65
95	29	50	65	65
120	36	65	65	80
150	36	65	65	80
185	36	65	80	80

Observații.

1. Valorile diametrelor date în tabel sînt cele ale tuburilor IPE (deasupra liniei frînte) și ale țevilor de oțel de instalații (sub linia frîntă). În cazul în care se alege alt tip de tub sub țeava de protecție, se vor folosi diametrele echivalente date în tabelul 8.87.

2. Valorile înscrise în tabel se aplică la alegerea diametrelor tuburilor și țevilor în toate condițiile de pozare, între două doze neexistînd însă mai mult de trei curbe sau coturi.

3. Valorile date în tabel sînt valabile și în cazul folosirii altor conductoare izolate cu același diametru exterior.

Tabelul 8.87. **Diametrele interioare ($\varnothing_i$) și exterioare ($\varnothing_e$) ale tuburilor și țevilor de protecție pentru conductoarele izolate**

Diametrul de referință, mm	Tuburi metalice izolante				Tuburi izolante PVC				Tuburi și țevi metalice				Țevi PVC	
	IP; IPF		IPE		IPY		IPEY		PEL		T		U	
	$\varnothing_i$ mm	$\varnothing_e$ mm	$\varnothing_i$ mm	$\varnothing_e$ mm	$\varnothing_i$ mm	$\varnothing_e$ mm	$\varnothing_i$ mm	$\varnothing_e$ mm	$\varnothing_i$ mm	$\varnothing_e$ mm	$\varnothing_i$ mm	$\varnothing_e$ mm	$\varnothing_i$ mm	$\varnothing_e$ mm
9	—	—	—	—	—	—	—	—	12,8	15,2	—	—	—	—
11	11	15,8	11	18,6	11	13	—	—	16	18,6	—	—	—	—
13,5	13,5	18,7	13,5	21,4	14	16	14	16	17,8	20,4	15	17	—	—
16	16	21,2	16	22,5	16	18	16,8	20	19,9	22,5	20	21,8	—	—
21	23	28,5	21	28,3	21,8	25	21,8	25	25,5	28,3	25	26,8	—	—
29	29	31,5	29	37	28,4	32	28,8	32	34,2	37	32	33,5	—	—
36	36	42,5	36	47	35,4	39	36,4	40	44	47	40	42,3	—	—
42	—	—	42	54	—	—	46	50	51	54	—	—	46	50
48	—	—	—	—	—	—	—	—	56,3	59	50	60	57,8	63
65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	65	75,5	69,8	75
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80	88,5	84,2	90

Tabelul 8.88. **Conductoare cu domenii speciale de utilizare**

Domenii de utilizare		Tensiune nominală, V	Conductoare corespunzătoare (tipuri de bază)
Conducte pentru autovehicule:	aprindere	10 000	VA; VAI; VACT
	lumină şi pornire	150	VLP; VLPAr; VLPY
	lumină	150	VLm; VLmp; VLmAr
	locomotive mină	500 c.a. ...1000 c.c.	VLM
	aviaţie	10 000	VAvPL
	acumulatoare	–	–
Cabluri navale de lumină şi forţă, manta	plumb	1000 c.c. 500 c.a.	CNP
	cauciuc		CNI; CNIE; CNIff; CNIAr
	PVC		CNYY; CNYYE
	cauciuc, flexibile		CNM; CNMAr; CNMI; CNMA
Cabluri miniere pentru	maşini havat cărbune	660	Tip 1–7
	benzi rulante, excavatoare	660; 3000; 6000	ecranate şi neecranate
	instalaţii forare	250	ecranate şi neecranate
	iluminat abataje	250; 660	armate
	instalaţii mobile în cariere şi mine	660; 3000 6000	cu sau fără întăritură exterioară de pînză
Cabluri pentru prospecţiuni petroliere, pentru	lucrări geofizice (de carotaj)	–	KBG; KOBD; KOBDT; KRT; KSB; KTB; KTBT; KTO; KST; KSTN
	alimentarea aparatelor de măsurat şi control în lucrări geofizice	–	KPUS; PM; PMO; PRS; PSM; PSMO; PSMS; KRBK; KRPB; KRE; KREP; KTSE
	alimentarea instalaţiilor petroliere	–	KTO; PrECu; PrECuO; PrEY; PrSY; PrGCu; PrGCuO; CEP; CEI; CE; OCE; CEY; OCEY; R

Tabelul 8.89. **Conductoare izolate de curenţi tari pentru instalaţii fixe**

Denumirea conductorului		Simbol	Tensiune nominală V	STAS	Domeniul de utilizare
Conducte de cupru sau aluminiu cu izolaţie de cauciuc		F AF	⩽ 500 c.a. 1000 c.c.	526-67 5699-67	În instalaţii electrice fixe interioare pe role sau în tuburi
Conducte de cupru cu izolaţie de cauciuc, flexibile		Ff	⩽ 500 c.a. 1000 c.c.	526-67	În instalaţii electrice fixe, cînd se cere la montaj conductor flexibil
Conducte de cupru cu izolaţie de cauciuc pentru corpuri de iluminat		Fci; Fcii; Fcip; Fcipi	250	1023-67	În instalaţii fixe, pentru legături în corpurile de iluminat şi racordarea acestora la reţea în încăperi uscate
Conducte de cupru cu izolaţie de cauciuc pentru suspendarea corpurilor de iluminat		Fs	250	–	În instalaţii electrice fixe, pentru suspendarea corpurilor de iluminat în încăperi uscate
Conducte de cupru cu umplutură din fire textile, armate		FA 1000 FAf 1000	1000	5577-63	În mediu uscat, montate fix pe perete şi la instalaţii pe macarale, poduri rulante, ascensoare etc.
Conducte de cupru cu manta de cauciuc, armate		FAC 1000 FACf 1000	1000	5577-63	În medii cu intemperii, abur, ploaie, montate fix (estacade, macarale, betoniere etc.)
Conducte de cupru speciale cu izolaţie de cauciuc		FS; FSf; FSff	2000–15 000	5647-68	În instalaţiile fixe din mediile corosive
Conducte punte	cu izolaţie PVC şi manta cauciuc	FPYC AFPYC	1000	6864-63	În încăperi uscate şi umede cu intermitenţă, în montaj obişnuit îngropat în elemente de construcţie incombustibile sau între straturi incombustibile; în situaţii de provizorat poate fi montat aparent pe elemente de construcţii sau straturi incombustibile
	cu izolaţie cauciuc şi manta PVC	FCPY AFCPY			
	cu izolaţie şi manta din PVC	FPYY AFPYY			
Conducte de cupru sau aluminiu cu izolaţie din policlorură de vinil		FY AFY	500	6865-63	Ca şi conductoarele F şi AF, respectîndu-se temperaturile de montaj (– 5... + 35°C) şi cele de exploatare (– 20... ... + 40°C)

Tabelul 8.90. **Conductoare izolate de curenţi tari pentru racordarea receptoarelor mobile**

Denumirea conductorului		Simbol	Tensiunea nominală V	STAS	Domeniul de utilizare
Şnur cu izolaţie de cauciuc în împletitură textilă		M	250	4937-66	Racordarea aparatelor electrice de uz casnic sau pentru scopuri similare la reţea, pentru tensiuni nominale alternative de maximum 250 V
Cordon cu izolaţie din cauciuc în împletitură textilă (plat sau rotund)		Mp; Mr			
Cordon în PVC		MYp; MYYUp			
Cordon în manta PVC, execuţie	uşoară	MYYU	250	7350-65	Idem, la solicitări uşoare, respectiv mijlocii, respectînd tensiunea nominală
	mijlocie	MYYM	380		
Cordon în manta de cauciuc execuţie	uşoară	MCU; MCUT; MCUp; MCUpT	380	1236-66	Racordarea aparatelor electrice casnice şi semiindustriale, la solicitări mecanice uşoare (lămpi, reşouri etc.)
	mijlocie	MCM (T; p; pT)	500	1236-66	Idem, mijlocii (plite, cuptoare etc.)
Cablu în manta de cauciuc execuţie grea		MCG	750	1236-66	Racordarea aparatelor sau maşinilor mobile sau transportabile, la solicitări mecanice grele

9. APARATE ELECTRICE

9.1. APARATAJ DE JOASĂ TENSIUNE

Parametrii echipamentului[1])

Tensiunea nominală U_n a unui întreruptor este tensiunea la care se referă capacitatea de rupere a întreruptorului.

Tensiunea nominală de izolaţie U_i a unui întreruptor este tensiunea pentru care este prevăzută izolaţia întreruptorului.

Tabelul 9.1. **Tensiunile nominale standardizate, tensiunile nominale de izolaţie şi tensiunile de încercare a rigidităţii dielectrice** 1)

Tensiunile nominale V		Tensiunile nominale de izolaţie V		Tensiunea de încercare a rigidităţii dielectrice (50 Hz)
continue	alternative	continue	alternative	V_{ef}
24	24	—	—	
—	36	—	—	1000
48	48(42)	—	—	
—	—	60	60	
100 sau	110 sau	—	—	
125	127			
220 sau	220	—	250	2000
250				
400	380	440	—	
—	660(500)	—	660(500)	2500
800(750) [2])	—	800	800	3000
—	1000	1000	1000	
1200	—	1200	—	3500

Conform STAS 553-68.
[2]) Valorile din paranteze sînt folosite în tracţiunea electrică.

[1]) Condiţiile generale şi speciale precum şi terminologia specifică aparatajului electric de joasă tensiune sînt cuprinse în grupa de standarde F 45.

Curentul nominal de lucru I_n este determinat de condițiile de utilizare, modul de funcționare, domeniul de utilizare, durata de viață a părților componente și de tipul de protecție. Unui întreruptor i se pot atribui mai mulți curenți nominali de lucru diferiți, de exemplu pentru conectarea motoarelor, a sarcinilor capacitive sau rezistive.

Parametrii echipamentului caracterizează domeniul de utilizare al întreruptoarelor pentru motoare, în special al contactoarelor, care nu sînt suficient caracterizate prin indicarea unui curent nominal de lucru. În acest caz se atribuie valori numerice mai mari pentru performanțe mai ridicate.

Capacitatea de anclanșare a unui întreruptor se caracterizează prin curentul maxim (în cazul curentului alternativ, valoarea de vîrf a curentului de scurtcircuit trifazic asimetric maxim) pe care întreruptorul îl poate închide la tensiunea nominală și la inductanța sau factorul de putere impuse de circuitul respectiv.

Capacitatea nominală de rupere a unui întreruptor se caracterizează prin curentul cel mai mare (în cazul curentului alternativ, valoarea efectivă a curentului de scurtcircuit trifazic asimetric maxim) pe care aparatul îl poate întrerupe în cazul unei tensiuni de restabilire egală cu tensiunea nominală și la inductanța sau factorul de putere impuse de circuit.

Tabelul 9.2. **Clasificarea întreruptoarelor și contactoarelor**

Clasificare după	Tipul întreruptorului	Caracteristici	Exemple
Comportarea mecanică în pozițiile de comutare	Întreruptor de fine de cursă	Fără forță de revenire	Întreruptoare cu pîrghie, întreruptoare cu camă, întreruptoare de presiune
	Cheie (sau buton) de comandă	Cu forță de revenire	Contactoare, întreruptoare principale
	Întreruptoare cu blocaj de poziție	Cu blocaj mecanic și declanșare liberă	Întreruptoare, întreruptoare pentru protecția motoarelor
Modul de lucru	Întreruptoare manuale (sau acționate cu piciorul)	Acționate prin efort uman	Întreruptoate cu acționare manuală
	Întreruptoare cu comandă de la distanță	Acționate prin sursă auxiliară	Întreruptoare acționate cu aer comprimat, motor sau magnet
Capacitatea de rupere	Separatoare	Pentru întreruperea circuitelor practic fără sarcină activă	Întreruptoare de curenți mari, separatoare de izolare de protecție
	Întreruptoare de sarcină	Cu o capacitate nominală de anclanșare și declanșare de pînă la aproximativ 1,5 I_n	Întreruptor cu pîrghie cu camere de stingere
	Demaroare pentru motoare	Cu o capacitate nominală de anclanșare și declanșare corespunzătoare curentului de pornire al motoarelor	Chei de comandă, contactoare, întreruptoare cu presiune
	Cu condiții grele de funcționare	Cu o capacitate nominală de anclanșare și declanșare conform tabelelor 9.3 și 9.6	Întreruptoare, întreruptoare de protecție pentru motoare

Tabelul 9.2 (continuare)

Clasificare după	Tipul întreruptorului	Caracteristici	Exemple
Modul de stingere a arcului	Întreruptoare în aer		În prezent, aproape exclusiv la întreruptoarele de joasă presiune
	Întreruptoare în ulei		Contactoare în ulei
	Întreruptoare cu jet de gaz		Cu utilizare redusă în tehnica de joasă tensiune
Utilizare	Întreruptoare de protecție	Pentru protecție la valori excesive ale curentului, creșterii de temperatură, tensiunii de defect sau tensiunii minime	Întreruptoare de protecție pentru motoare, automate de protecție împotriva curenților de punere la pămînt, automate de siguranță pentru instalații
	Întreruptoare de comandă	Pentru anclanșări și declanșări frecvente	Întreruptoare cu camă, contactoare
	Separatoare	Pentru întreruperea tuturor conductoarelor unui circuit cu indicare precisă a poziției	Întreruptor cu pîrghie de protecție
	Întreruptoare de alegere	Pentru alegerea unei căi de curent din două sau mai multe căi	Comutatoare, comutatoare multiple
	Chei de comandă	Pentru acționarea circuitelor de comandă	Întreruptoare cu buton de comandă Întreruptoare de comandă la situații anormale, relee
	Întreruptoare de cursă limitatoare, senzori	Pentru acționare atunci cînd limita prescrisă pentru o mărime fizică sau situație de funcționare este depășită sau nu este atinsă	Întreruptoare de fine de cursă, chei de fine de cursă, întreruptoare cu presiune, senzori de presiune, senzori termici
	Contacte auxiliare, normal deschise, normal închise, normal deschise-normal închise, trecător normal deschise	Pentru comutarea circuitelor auxiliare (secundare)	Elemente componente ale echipamentului secundar de comutare pentru comutarea circuitelor de acționare, blocaj și semnalizare, de exemplu

Tabelul 9.3. **Capacitatea de rupere minimă a întreruptoarelor de curent alternativ[1]) cu tensiuni nominale pînă la 1000 V**

Tipul aparatului	I_n A	Capacitatea de rupere, I_r, kA	cos φ
Întreruptoare automate pentru protecția motoarelor, rețelelor și transformatoarelor	$\leqslant 100$	5	0,5
	$\leqslant 200$	10	0,5
	$\leqslant 400$	15	0,3
	$\geqslant 630$	$15 < I_r \leqslant 50$	0,25
		> 50	0,2

[1]) Conform STAS 4480-68.

Tabelul 9.4. **Tipuri de contactoare şi caracteristicile lor principale** [1]

Tipul contactorului	Curentul nominal I_n, A	Tensiunea nominală U_n, V: curent continuu	Tensiunea nominală U_n, V: curent alternativ	Puterea maximă a motorului acţionat kW
AC3	10	—	500	4
	25	—	500	10
	40	—	500	17
	63	—	500	30
	100	—	500	40
	200	—	500	100
BC	60	220	—	—
MC	80	220	—	—
	100	750	—	—
	150	220	—	—
RMC	80	220	—	—
	150	220	—	—
MCA	16	3000	3000	—

[1]) Conform STAS 4479-61.

Tabelul 9.5. **Valori standardizate pentru curenţii nominali, în A** [1])

							0,05	0,06	0,08
0,1	0,12	0,16	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5 [2])	6,3	8
10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
100	125 [3])	160	200	250	315	400	500	630	800
1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000

[1]) Conform STAS 4297-66.
[2]) Se referă la aparatele care urmează să fie alimentate din secundarul transformatoarelor de măsurat.
[3]) Valoare tolerată.

Tabelul 9.6. **Capacitatea de rupere minimă a întreruptoarelor de curent continuu** [1]) **cu tensiuni nominale pînă la 1200 V**

Tipul aparatului	I_n A	Capacitatea de rupere	I/R ms
Întreruptoare automate pentru protecţia motoarelor şi reţelelor	⩽ 100	5	15
	⩽ 200	8	15
	⩽ 400	15	15
	⩾ 630	< 15	15

[1]) Conform STAS 4480-68.

Curentul nominal de scurtcircuit de şoc este valoarea instantanee maximă admisibilă a curentului de scurtcircuit neamortizat de pe calea de curent cu solicitarea maximă, al cărui efect dinamic este suportat de întreruptor fără a fi deteriorat.

Curentul nominal de scurtă durată este curentul admisibil de scurtă durată pe care întreruptorul îl poate suporta timp de 1 s fără a suferi deteriorări din cauza creşterii temperaturii. În locul acestui curent se poate folosi un curent de scurtcircuit cu indicarea timpului admisibil.

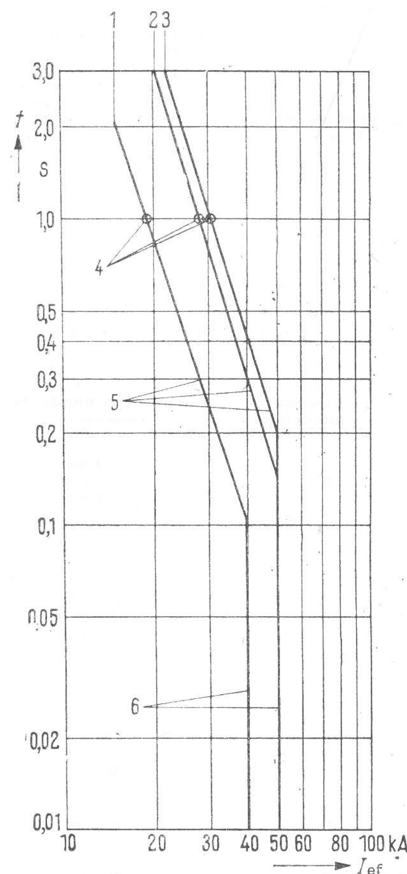


Fig. 9.1. Curenţi admisibili ai întreruptoarelor (aparate Siemens):
1 — întreruptor pentru curent nominal I_n = 1000 A; *2* — întreruptor pentru curent nominal I_n = 2000 A; *3* — întreruptor pentru curent nominal I_n = 3000 A; *4* — curent nominal de scurtă durată (1 s); *5* — curent de scurtă durată; *6* — curent de scurtcircuit de şoc.

Parametrii termici

Creşterea maximă de temperatură este creşterea admisibilă de temperatură stabilită pentru elementele componente ale echipamentului.

Temperatura maximă este temperatura admisibilă stabilită pentru elementele componente ale echipamentului. Ea este egală cu suma dintre creşterea maximă de temperatură şi temperatura stabilită pentru aerul ambiant.

Tabelul 9.7. **Supratemperaturi maxime admisibile ale contactelor** [1])

Denumirea elementului din aparat	Execuţia sau materialul elementului	Supratemperatura maximă admisibilă grd
Piesă de contact în aer	a) lamele cu arcuire proprie din cupru sau aliaje din cupru –	35
	b) masive cu arcuire separată, forţa de contact pînă la 2 kgf, din cupru sau aliaje din cupru	45
	c) masive cu arcuire separată, forţa de contact peste 2 kgf, din cupru şi aliaje de cupru	65
	d) cu plăci de argint lipite cu aliaje de cositor (STAS 96-49)	80
	e) cu plăci de argint sudate sau lipite cu aliaje de alamă sau argint –	Limitată numai de temperatura maximă admisibilă a pieselor învecinate

[1]) Conform STAS 553-68.

Tabelul 9.8. **Durata de viaţă nominală a echipamentului electric fabricat în România**

Clasa de serviciu intermitent	Durata de viaţă mecanică, în număr de conectări	Tipul aparatului
0	1 000	Separatoare tripolare pentru interior de 1 kV
	2 000	Întreruptoare cu manetă tripolare de 200, 350, 600 şi 1000
	5 000	Întreruptoare cu pîrghie tripolare de 25, 63 şi 100 A A
I	8 000	Întreruptoare automate de uz general tip AMT 200
	10 000	Întreruptoare automate de uz general tip AMT 400, DITA 1000 şi AG 350 şi întreruptor monopolar de curent continuu tip AV 2
	100 000	Contactoare cu relee în aer DITA 25 şi contactor cu relee în construcţie antigrizutoasă tip AG 60
	120 000	Contactoare cu relee în aer tip AC 3 de 10–160 A şi de tip antiexploziv
	250 000	Contactoare monopolare de curent continuu şi alternativ tip MCA 16 pentru instalaţii de încălzire în vagoane CFR şi contactor cu relee în construcţie antigrizutoasă tip AG de 25 şi 125 A
	300 000	Contactoare bipolare de curent continuu tip BC 60 pentru acţionări de scurtă durată
	500 000	Contactoare de curent continuu de 40, 80, 150 şi 250 A, pentru motoare de tracţiune
II	100 000	Contactoare cu relee, în ulei tip DITU de 25, 60 şi 100 A şi contactoare cu relee în aer tip DITA de 60, 100 şi 200 A
	300 000	Contactoare monopolare de curent continuu tip MC de 80 şi 150 A, ruptor RMC de 80 şi 150 A şi contactor bipolar tip BC 80
	500 000	Contactoare de comandă pentru circuite auxiliare de curent continuu
	5 000 000	Contactoare tip AC3 de 100 şi 200 A
III	1 000 000	Contactoare monopolare de curent continuu tip MC 100 pentru motoare de troleibuz
	5 000 000	Contactor tip AC 3 de 40 şi 63 A
	10 000 000	Contactoare de tip AC3 de 10 şi 25 A

Frecvenţa de lucru

Este numărul de cicluri de lucru (numărul de operaţii de conectare şi deconectare) pe oră.

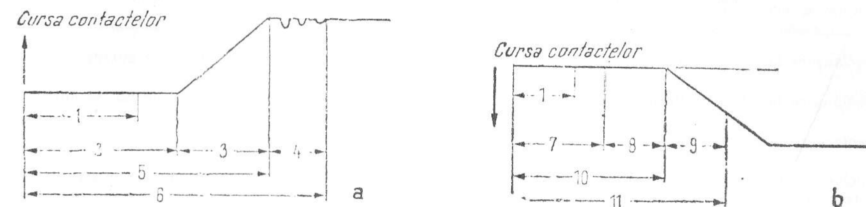


Fig. 9.2. Timpii întreruptoarelor:
a — conectare; *b* — deconectare; *1* — durata minimă a comenzii; *2* — întîrziere la acţionare; *3* — timpul de închidere; *4* — durata de vibrare; *5* — întîrziere la anclanşare; *6* — timpul total de anclanşare; *7* — timpul de deblocare; *8* — timpul propriu al întreruptorului; *9* — durata arcului; *10* — întîrzierea la declanşare; *11* — timpul total de declanşare.

Tabelul 9.9. **Timpii întreruptoarelor** [1])

Denumirea	Durata
	Pentru procesele de anclanşare şi declanşare
Durata minimă a comenzii	Durata minimă a comenzii de anclanşare sau de declanşare necesară pentru închiderea sau deschiderea completă a întreruptorului
	Pentru procesul de închidere (anclanşare)
Întîrzierea la acţionare	De la începutul comenzii pînă la începutul mişcării contactului
Timpul de închidere	De la începutul mişcării contactului pînă la prima atingere a contactelor primului pol care se închide
Durata de vibraţie	De la prima pînă la ultima închidere a contactelor
Întîrzierea la anclanşare	Suma timpilor de întîrziere la punerea în mişcare şi de închidere
Timpul total de anclanşare	Timpul de la începerea comenzii pînă la închiderea finală a tuturor contactelor
	Pentru procesul de deschidere (declanşare)
Timpul de deblocare	De la apariţia stării care determină deblocarea pînă la deblocarea întreruptorului
Timpul propriu al întreruptorului	De la deblocarea întreruptorului pînă la deschiderea contactului din ultima cale de curent
Durata arcului	De la deschiderea contactului pînă la stingerea arcului la toţi polii
Întîrzierea la declanşare	Suma timpului de deblocare cu timpul propriu al întreruptorului
Timpul total de declanşare	Timpul de la apariţia stării care determină deblocarea pînă la sfîrşitul circulaţiei de curent la toţi polii

[1]) **Definiţiile acestor timpi standardizaţi în R.S.R. sînt stabilite prin STAS 4480-68.**

Tabelul 9.10. **Dispozitive de declanşare cu măsurare şi relee**

Modul de declanşare	Declanşare la
Declanşare la suprasarcină	Depăşirea unei anumite valori de curent
Declanşare la curent minim	Scăderea curentului sub o anumită valoare
Declanşare la curent invers	Inversarea sensului curentului
Declanşare la tensiune minimă, declanşare la tensiune nulă	Scăderea tensiunii sub o anumită valoare
Declanşare la curent de defect	Depăşirea unui anumit curent de defect
Declanşare la tensiune de defect	Depăşirea unei anumite valori a tensiunii de defect
Supraintensitate în conductorul comun	Depăşirea unui anumit curent în conductorul comun

Dispozitive de declanşare şi relee

Dispozitivele de declanşare sînt elemente componente ale întreruptoarelor pe care le deblochează mecanic. Releele sînt dispozitive care comandă electric alte dispozitive. Dispozitivele de declanşare şi releele sînt acţionate de mărimi fizice, în special electrice, care variază.

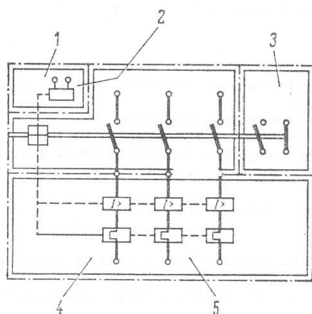


Fig. 9.3. Schema de legături a unui întreruptor de protecţie pentru motoare prevăzut cu dispozitive de declanşare de curent temporizate termic şi instantanee electromagnetice şi cu dispozitiv de declanşare la tensiune minimă: *1* — dispozitiv de declanşare în circuit deschis (cu curent de lucru); *2* — dispozitiv de declanşare la tensiune minimă; *3* — contacte auxiliare; *4* — placă cu borne; *5* — dispozitiv de declanşare trifazică la supracurent.

Există dispozitive de declanşare cu măsurare şi dispozitive de declanşare fără măsurare (de exemplu în circuit deschis).

Tabelul 9.11. **Valori de reglaj şi de acţionare ale dispozitivelor de declanşare electromagnetice cu măsurare şi ale releelor** [1])

Mărimea de acţionare	Utilizare		Valoarea temporizării	Valoarea de reglaj ca multiplu al valorii nominale: Reglabilă între limitele	Valoarea de reglaj ca multiplu al valorii nominale: Fixă, reglată la o valoare cuprinsă între
Supracurent	Mod preferat de declanşare la scurtcircuit pentru	Automate de protecţie pentru generatoare	Fără temporizare sau cu temporizare scurtă	3 pînă la 6 — 6 pînă la 12 ∼	
		Automate de linie		2 pînă la 4 — 3 pînă la 6 ≂	2 şi 6 — 3 şi 6 ∼
		Automate pentru motoare	Fără temporizare	4 pînă la 8 ∼	8 şi 14 ∼
	Pentru declanşare la suprasarcină		Temporizare dependentă sau independentă de curent	1,2 pînă la 2 ≂	
Curent minim	Întreruptor sau releu de curent minim		Instantaneu		0,1 şi 0,15 —
Curent invers	Întreruptor sau releu de curent invers		Instantaneu		0,05 şi 0,15
Tensiune minimă	Releu sau dispozitiv de declanşare de tensiune minimă pentru automate de protecţie		Fără temporizare, sau cu temporizare independentă, sau cu temporizare dependentă		0,07 şi 0,35
Tensiune nulă	Relee sau dispozitive de declanşare de tensiune nulă pentru automate de protecţie		Instantaneu		0,35 şi 0,1 ≂
Curent de defect	Automate de protecţie la curent de defect (ID)		Temporizare scurtă, timpul de întrerupere $\leqslant 0,2$ s		
	Declanşare prin curent diferenţial pentru automate de protecţie pentru instalaţii		Temporizare dependentă		

1) Condiţiile generale privind releele electrice de măsurat standardizate în R.S.R. sînt stabilite în STAS 4196-63.

Tabelul 9.12. **Curenți de acționare și timpi de declanșare ai dispozitivelor de declanșare la supracurent și ai releelor dependente de curent, cu temporizare termică (dispozitive și relee cu bimetal) la temperatura ambiantă de 20°C**

Curentul de acționare ca multiplu al valorii de reglaj	Timpul de declanșare	Observații
1,05	> 2 h	Începînd din stare rece
1,20 [1])	< 2 h	Începînd din starea de funcționare caldă [2])
1,50	< 2 min [3])	Începînd din starea de funcționare caldă [2])
6,00	> 2 s[4]) > 5 s[5])	Începînd din stare rece
2,00	< 30 s	Începînd din stare rece [6])

[1]) În cazul cînd dispozitivele de declanșare sau releele trifazice au sarcina numai pe doi poli, se admite o creștere a curentului de acționare cu 10%, iar în cazul sarcinii pe un singur pol, creșterea admisibilă este de 20%.

[2]) Încărcare prealabilă cu curentul de reglaj pînă la încălzirea finală.

[3]) Pentru întreruptoare de protecție a motoarelor. Se admit timpi mai lungi de declanșare în cazul automatelor pentru motoare cu condiții grele de pornire, dacă motoarele suportă suprasarcini cu o durată mai mare de 2 min de 1,5 ori curentul nominal al motorului.

[4]) Pentru automate de protecție de motoare, în cazul motoarelor cu condiții ușoare de pornire: grad de inerție I (v. fig. 9.4).

[5]) Pentru automate de protecție de motoare, în cazul motoarelor cu condiții grele de pornire: grad de inerție II.

[6]) Numai pentru dispozitive de declanșare de pe conductorul median al întreruptoarelor de protecție de instalații.

Siguranțe de joasă tensiune cu mare putere de rupere (siguranțe JTMPR[1])

Siguranțele JTMPR de joasă tensiune au un element fuzibil și o capacitate nominală de rupere de cel puțin 25 kA pentru o tensiune alternativă de 500 V și pentru o tensiune continuă de 440 V. Siguranțele MPR se compun dintr-un soclu și un element fuzibil ce se poate schimba [2]).

Tabelul 9.13. **Dimensiuni de siguranțe 00-4**

Dimensiunea	Curentul nominal
00	6 pînă la 100
0	6 pînă la 160
1	80 pînă la 250
2	200 pînă la 400
3	315 pînă la 630
4	500 pînă la 1000

Tipuri de siguranțe: lente și instantanee (rapide).

[1]) Inițialele JTMPR înlocuiesc expresia germană „siguranța de joasă tensiune și mare putere".

[2]) Condițiile generale privind siguranțele rapide cu mare putere de rupere, de joasă tensiune, standardizate în România sînt stabilite în STAS 4173-67.

Tabelul 914. **Curenți de încercare și durata încercărilor pentru elemente fuzibile închise**

Curentul nominal I_n A	Curent de încercare de valoare redusă (fără întrerupere în timpul încercării)	Curent de încercare de valoare mare (întrerupere în timpul încercării)	Durata încercării, ore
Peste 25 pînă la 63	1,3 I_n	1,6 I_n	1
Peste 63 pînă la 160	1,3 I_n	1,6 I_n	2
Peste 160 pînă la 400	1,3 I_n	1,6 I_n	3

Tabelul 9.15. **Timpii siguranțelor**

Denumirea	Timpul
Timp de topire	De la apariția supraintensității pînă la începerea procesului de întrerupere
Timp de stingere	De la începutul pînă la sfîrșitul procesului de întrerupere
Timp de întrerupere	Suma timpului de topire și timpului de stingere
Caracteristica	Raportul dintre intensitatea curentului de topire și supraintensitate

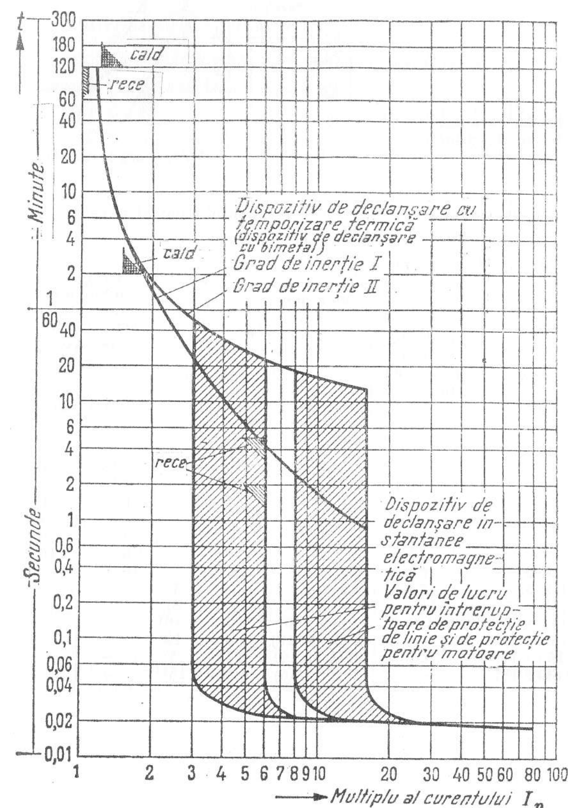


Fig. 9.4. Modul de declanșare al întreruptoarelor de suprasarcină cu temporizare termică și declanșator instantaneu electromagnetic.

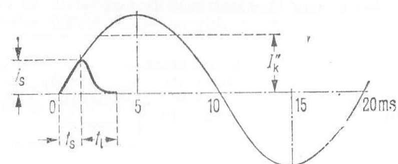


Fig. 9.5. Curenți și timpi caracteristici pentru siguranțe fuzibile:
t_l — timp de stingere; t_s — timp de topire;
I_k'' — curentul de scurtcircuit simetric inițial;
i_s — valoarea de vîrf a curentului real, în A.

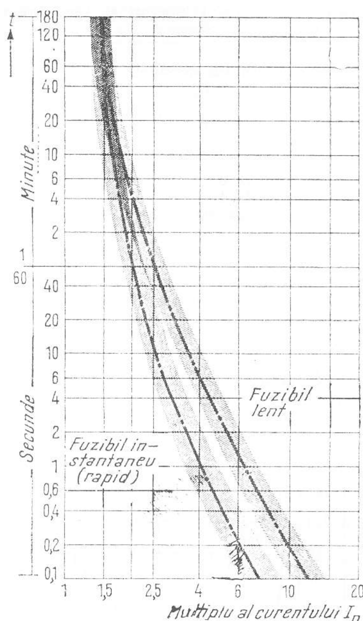


Fig. 9.6. Caracteristici de timp de topire a siguranțelor fuzibile (I_n = 80 A) cu benzi de dispersiune.

Tabelul 9.16. **Secțiunile nominale ale conductoarelor de racord funcție de curentul nominal al aparatului [1])**

Curentul nominal A	Secțiunea nominală a conductoarelor — minimă: Conductor rotund masiv sau flexibil mm²	minimă: Bară de Cu mm	minimă: Bară de Al mm	maximă: Conductor rotund masiv sau flexibil mm²	maximă: Bară de Cu mm	maximă: Bară de Al mm	Secțiunea nominală a conductoarelor pentru prize și fișe mobile mm²: minim	maxim
pînă la 6,3	0,75	—	—	2,5	—	—	0,75	1
10	1	—	—	2,5	—	—	0,75	1
16	1,5	—	—	4	—	—	1	1,5
31,5	4	—	—	6	—	—	2,5	4
40	6	—	—	10	—	—	4	6
63	10	—	—	16	—	—	6	10
100	16	15 × 2	15 × 3	25	20 × 2	20 × 5	16	25
200	50	20 × 3	20 × 5	70	25 × 5	2 (20 × 5)	—	—
400	120	30 × 5	2 (30 × 3)	185	2 (25 × 5)	2 (30 × 5)	—	—
630	240	40 × 10	2 (40 × 5)	2 × 185	2 (40 × 5)	2 (40 × 10)	—	—
1000	2 × 240	50 × 10	2 (50 × 10)	—	2 (50 × 10)	2 (80 × 10)	—	—
2000	—	2(80 × 10)	2(100 × 10)	—	2(100 × 10)	2(120 × 15)	—	—
3150	—	2(120 × 10)	2(160 × 10)	—	2(100 × 10)	2(160 × 15)	—	—

[1]) Conform STAS 553-68.

9.2. APARATAJ DE ÎNALTĂ TENSIUNE [1])

9.2.1. Întreruptoare [2])

Generalități

Întreruptoarele sînt dispozitive automate care au o astfel de capacitate de rupere și de anclanșare încît aparatul poate suporta solicitările care se produc atunci cînd echipamentul și părți ale unei instalații sînt anclanșate sau declanșate în condiții normale și anormale, în special în condiții de scurtcircuit.

Valorile nominale sînt valorile caracteristice pentru care sînt dimensionate întreruptoarele sau accesoriile lor și la care se raportează alte valori nominale.

Valorile nominale cuprind:

Tensiunea nominală, frecvența nominală, curentul nominal, curentul nominal nesimetric, curentul nominal de scurtă durată, curentul nominal de rupere (simetric sau nesimetric), puterea nominală de rupere, curentul nominal de anclanșare, frecvența naturală nominală a tensiunii de restabilire, factorul nominal de amplitudine, regimul nominal de funcționare, presiunea nominală.

Valoarea nominală a izolației este o denumire standardizată pentru caracterizarea parametrilor izolației unui întreruptor sau ai unui element accesoriu.

Puterea de rupere

Puterea de rupere simetrică nominală P_r (în VA) a unui întreruptor tripolar se definește prin relația

$$P_r = I_{pr} U_r \sqrt{3}$$

în care: I_{pr} este curentul nominal de rupere simetric (în A) în momentul primei separări a contactelor;
U_r — tensiunea de restabilire de linie (în V), la frecvența de serviciu, după întreruperea curentului la toți polii și amortizarea componentei tranzitorii a tensiunii de restabilire.

Puterea de rupere este o valoare convențională, deoarece cele două elemente care o compun și anume „curentul nominal de rupere" și „tensiunea de restabilire" nu apar simultan, ci consecutiv. Conform convențiilor internaționale, în viitor se va folosi numai curentul nominal de rupere pentru definirea capacității de rupere a unui întreruptor.

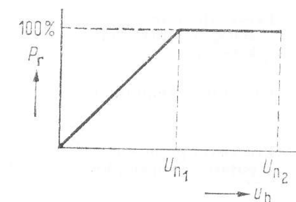


Fig. 9.7. Caracteristica puterii de rupere a unui întreruptor în funcție de tensiunea de lucru:
P_r — puterea de rupere; U_b — tensiunea de lucru; U_{n1} — tensiunea nominală inferioară; U_{n2} — tensiunea nominală superioară.

Regim de lucru

Stingerea arcului nu se produce simultan la cei trei poli ai unui întreruptor trifazic, ci consecutiv, la trecerea prin zero a curentului pe cele trei faze. De asemenea, solicitarea pe cei trei poli este diferită în raport cu tensiunea maximă și durata trecerii cu-

[1]) V. STAS 5081-55.
[2]) V. STAS 3686-63 (în curs de revizuire).

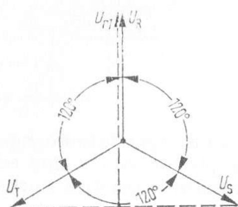


Fig. 9.8. Steaua tensiunilor înainte și după întreruperea curentului pe primul pol la care se execută stingerea (Faza R) în timpul întreruperii unui scurtcircuit trifazic U_R, U_S, U_T — tensiuni pe fază; U_{r1} — tensiunea de restabilire la primul pol care execută întreruperea, după întreruperea curentului și amortizarea componentei tranzitorii a tensiunii de restabilire.

rentului; în general, primul pol care întrerupe curentul este solicitat cel mai puternic de tensiunea de restabilire mai mare a polului respectiv.

Solicitarea cea mai mare dată de tensiune, pe care trebuie să o poată suporta rigiditatea dielectrică a izolației apare imediat după întreruperea curentului, înainte de amortizarea componentei tranzitorii a tensiunii de restabilire și se numește tensiunea tranzitorie de restabilire e_m. Expresia ei (în V) este

$$e_m = U_{r1}\gamma\sqrt{2},$$

în care: U_{r1} este tensiunea de restabilire pe pol (în V), la primul pol care execută întreruperea;
γ — factorul de amplitudine.

Pentru solicitarea izolației are importanță caracteristica de timp a tensiunii de restabilire. Aceasta se determină pentru circuitul cu o singură frecvență[1]) cu ajutorul frecvenței proprii de oscilație (f_n în Hz):

$$f_n = \frac{1}{2t_m},$$

unde t_m (în s) este durata de timp între valoarea zero și valoarea de vîrf a tensiunii tranzitorii de restabilire.

La încercarea întreruptoarelor pentru diverse tensiuni nominale trebuie să se respecte anumite valori ale factorului de amplitudine γ și ale frecvenței proprii de oscilație f_n (în Hz) a tensiunii tranzitorii de restabilire.

9.17. Frecvențele proprii de oscilație ale tensiunilor tranzitorii de restabilire și factorii de amplitudine[1])

Tensiunea nominală, kV	6	10	(15)	20	35	(60)	110	220	400
Frecvența proprie la 100% putere de rupere, kHz	6	4	3,3	2,5	1,8	1	0,8	0,6	0,4
Factorul de amplitudine	1,5								
Frecvența proprie la 50% putere de rupere, kHz	20	15	12	9	7	4,5	3	2	1
Factorul de amplitudine	1,5								

[1]) Conform STAS 3686-63 (în curs de revizuire).

Condiții de comutare

În afară de întreruperea curenților de sarcină în condiții de lucru, întreruptoarele trebuie să îndeplinească o serie de condiții speciale de comutare. Cele mai importante dintre acestea sînt prezentate în tabelul următor.

[1]) Într-un circuit cu frecvență multiplă sînt necesari patru parametri pentru determinarea caracteristicii de timp a tensiunii tranzitorii de restabilire. Aceștia sînt: viteza inițială de creștere, factorul inițial de creștere, frecvența proprie de oscilație și factorul de amplitudine.

Condiții de lucru	Cerințe speciale
Scurtcircuit la borne	Curentul maxim
Reanclanșare automată rapidă	Solicitare puternică a izolației datorită operațiilor de comutare care se succed rapid. Ciclu de încercare D-300 ms-ID-3 min-ID
Defect kilometric	Viteză mare de creștere inițială a tensiunii tranzitorii de restabilire datorită suprapunerii oscilației de înaltă frecvență peste tensiunea de restabilire la frecvențele de serviciu
Opoziție de fază	Tensiune tranzitorie de restabilire mare sau tensiune de restabilire la frecvența de serviciu mare pe pol
Dublă punere la pămînt	Tensiune tranzitorie de restabilire mare sau tensiune de restabilire la frecvența de serviciu mare pe pol
Anclanșarea liniilor aeriene și a cablurilor la mers în gol	Valoare ridicată a tensiunii de restabilire la frecvența de serviciu pe pol, determinată de sarcina capacitivă reziduală a liniei sau a cablului. Reamorsarea nu trebuie să se producă din cauza posibilității mărite de apariție a unor supratensiuni de comutație de valoare ridicată, datorite acestor sarcini
Anclanșarea transformatoarelor în gol	Evitarea supratensiunilor de comutație prin tăierea curentului pe cît posibil înainte de trecerea prin zero
Defect evolutiv (variație bruscă a curentului de la o valoare redusă la o valoare ridicată, în cursul operației de comutare, de exemplu în urma unor conturnări în porțiunea directă întreruptă și străpungerea simultană prin arc a distanțelor de izolație)	Solicitare termică ridicată (în special în cazul întreruptoarelor cu stingere de arc dependentă de curent) provocată de arcuri lungi

Caracteristici

P u t e r i   n o m i n a l e   d e   r u p e r e standardizate[1]) pentru întreruptoarele de înaltă tensiune trifazate: 50 (75)[2]), 100 (125), 150, 250, 350 (400), 500, 750, 1000, 1500, 2500, 3500, 5000, 6000, 7500, 10000, 12000, 15000, 25000 MVA.

În viitor se vor standardiza curenții nominali de rupere în locul puterilor nominale de rupere. În prezent sînt în discuție următoarele valori: 5,0; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100 kA.

[1]) V. STAS 3686-63.
[2]) Valorile din paranteze nu sînt recomandate.

Tabelul 9.18. **Curenţi nominali pentru întreruptoare de înaltă tensiune**

Aparatul	Curenţi nominali standardizaţi, A
Elemente pentru siguranţe MPR şi dispozitive de declanşare în serie, tensiuni nominale 1–60 kV	6, 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 200, 250 [1]), 315 [2]), 400 [2]), 630 [2])
Întreruptoare şi separatoare, tensiuni nominale 1–60 kV	200 [3]), 400, 630, (1000), 1250, 1600, (2000), 2500, 4000, 6300, 8000
Întreruptoare şi separatoare, tensiuni nominale 110 kV şi valori superioare	400 [4]), (630), 800, (1000), 1250, 1600, 2000

[1]) Numai pentru elemente fuzibile.
[2]) Dispozitive de declanşare serie.
[3]) Suporţi de fuzibile.
[4]) Separatoare de sarcină şi separatoare.
[5]) Curenţii nominali standardizaţi în R.S.R. sînt daţi în STAS 3686-63 şi 8087-68.

Timpi de comutare

T i m p u l   d e   î n c h i d e r e este intervalul de timp dintre momentul în care mărimea ce acţionează asupra dispozitivului auxiliar sau a contactorului asociat cu întreruptorul atinge valoarea de lucru şi momentul în care contactele se închid, stabilind circuitele la toţi polii.

T i m p u l   d e   d e s c h i d e r e este intervalul de timp dintre momentul în care mărimea ce acţionează asupra dispozitivului auxiliar sau a contactorului asociat cu întreruptorul atinge valoarea de lucru şi momentul separării contactelor, întrerupînd circuitele la toţi polii.

D u r a t a   a r c u l u i este intervalul de timp dintre momentul separării contactelor care întrerup circuitul la primul pol şi sfîrşitul circulaţiei de curent la toţi polii.

T i m p u l   t o t a l   d e   î n t r e r u p e r e este intervalul de timp dintre momentul în care mărimea ce acţionează asupra dispozitivului sau contactorului asociat cu întreruptorul atinge valoarea de lucru şi sfîrşitul circulaţiei de curent la toţi polii.

T i m p u l   (p a u z a)   d e   r e a n c l a n ş a r e este intervalul de timp dintre momentul în care mărimea ce acţionează asupra dispozitivului sau contactorului folosit pentru declanşarea întreruptorului atinge valoarea de lucru şi restabilirea circulaţiei de curent la primul pol.

Timpul total de întrerupere (la curent nominal) este de 0,05–0,06 s în cazul întreruptoarelor indicate în tabelele 9.19 şi 9.20.

Încercările echipamentului de tip interior se execută în condiţii uscate şi cu atmosferă curată, iar încercările echipamentului de tip exterior se execută sub ploaie.

Tabelul 9.19. **Mărimi nominale ale întreruptoarelor tripolare [1]) [2])**

Mărimea nominală	Tensiunea nominală Inferioară kV	Tensiunea nominală Superioară kV	Puterea nominală de rupere MVA	Curentul nominal A
Cu mediu de stingere–ulei (întreruptoare T)				
10	6	7,2	100	400
			150	630, 1250, 1600
			250	630, 1250, 1600
			350	630, 1250, 1600, 2500
			500	1250, 2500
			750	1250, 2500
10	10	12	150	400
			250	630, 1250, 1600
			350	630, 1250, 1600
			500	630, 1250, 1600, 2500
			750	1250, 2500
			1000	1250, 2500
20	20	24	250	630
			350	630, 1250
			500	630, 1250
			1000	1250, 2500
30	30	36	500	630
			750	1250
			1000	1250, 2500
			1500	1250, 2500

[1]) Tip Siemens.
[2]) Pentru întreruptoarele fabricate în R.S.R. v. STAS 3686-63 (p. 5 şi 6).

Tabelul 9.20. Mărimi nominale ale întreruptoarelor tripolare [1]) pentru 60—380 kV

Mărimea nominală	Tensiunea nominală Inferioară kV	Tensiunea nominală Superioară kV	Puterea nominală de rupere MVA	Curentul nominal A
a) Cu mediu de stingere–ulei				
60	60	72,5	1500	800, 1250
110	110	123 [2])	2500	800, 1250, 1600
			3500	800, 1250, 1600
			4000	1250, 1600, 2000
			5000	1250, 1600, 2000

[1]) Tip Siemens.

Tabelul 9.20 (continuare)

Mărimea nominală	Tensiunea nominală Inferioară kV	Tensiunea nominală Superioară kV	Puterea nominală de rupere MVA	Curentul nominal A
b) Cu mediu de stingere—gaz SF_6 [2])				
220	220	245 [3])	10 000 15 000	2000 2000
			20 000	2000
380	380	420	25 000	2000, 4000
			35 000	2000, 4000
500	500	525	35 000	2000, 4000

[2]) Gazul SF_6 (hexafluorură de sulf) are o rigiditate dielectrică deosebit de mare și caracteristici excepțional de bune la stingere. Este incolor, lipsit de gust, inactiv din punct de vedere chimic, neinflamabil și neotrăvitor.
[3]) În locul acestor valori sînt date valorile 125 și 250 respectiv în tabelul 9.21 și se are în vedere o adaptare.

Tabelul 9.21. **Mărimi nominale de izolație și tensiuni de încercare conform normelor germane** [1])

Seria izolației	Tensiunea maximă a echipamentului (de linie) kV	Tensiunea de încercare la frecvența industrială, valoare eficace: față de pămînt și între poli kV	Tensiunea de încercare la frecvența industrială, valoare eficace: distanța de izolare în aer kV	Tensiunea nominală de ținere la șoc, seria N (valoare de vîrf a undei pline): față de pămînt și între poli kV	Tensiunea nominală de ținere la șoc, seria N: distanța de izolare în aer kV	Tensiunea nominală de ținere la șoc, seria S (valoare de vîrf a undei pline): față de pămînt și între poli kV	Tensiunea nominală de ținere la șoc, seria S: distanța de izolare în aer kV
3 N/3 S	3,6	21	25	45	52	40	46
6 N/6 S	7,2	27	35	60	70	50	58
10 N/10 S	12	35	45	75	85	60	70
15 N/15 S [1])	17,5	45	60	95	110	75	85
20 N/20 S	24	55	75	125	145	95	110
25 N/25 S [2])	27,5	65	90	145	170	125	145
30 N/30 S	36	75	100	170	195	145	170
45 N/45 S	52	105	145	250	290	190	220
60 N/60 S	72,5	140	190	325	375	250	290
110 N/110 S	125	230	310	550	630	450	520
150 N/150 S	170	325	440	750	860	650	750
220 N/220 S	250	460	620	1050	1200	900	1040
110 NE/110 SE [3])	125	185	250	450	520	375	430
150 NE/150 SE [3])	170	275	370	650	750	550	630
220 NE/220 SE [3])	250	395	535	900	1040	750	860
380 NE/380 SE [3])	420	680	900	1425	1640	1300	1500

[1]) În special pentru echipament de tracțiune pe linii de cale ferată electrificate în curent alternativ.
[2]) Pentru linii de cale ferată electrificată în curent alternativ.
[3]) Pentru sisteme cu neutrul legat efectiv la pămînt.

9.2.2. Separatoare de sarcină [1])

Separatoarele de sarcină sînt separatoare care au o capacitate de anclanșare și de rupere astfel încît pot suporta fără a se defecta solicitările care au loc atunci cînd echipamentul și părțile unei instalații sînt introduse sau scoase dintr-un circuit și care, în poziția deschis au o distanță de izolare.

Capacitatea de rupere a acestor separatoare este dată de curenții de rupere de lucru. Curentul de rupere de sarcină I_s este curentul întrerupt la tensiunea nominală cu un factor de putere $\lambda \geqslant 0,7$. El se numește curentul nominal de rupere I_{sN}, dacă poate fi întrerupt de N ori de separator (de exemplu $I_{sN} = I_{s20}$). Se mai precizează și noțiunile de curent de rupere inductiv I_L (cu $\lambda \geqslant 0,15$), curentul de rupere capacitiv I_C și curentul de rupere de circuit buclat I_b. Și în acest caz indicele arată numărul de operații de comutare pe care separatorul le poate efectua la sarcina corespunzătoare (de exemplu I_{L200}).

Tabelul 9.22. **Valori maxime admisibile pentru mărimile nominale cele mai importante ale separatoarelor de sarcină** [1])

Tipul separatorului (seria tensiunii)	Tensiunea nominală kV_{ef}	Tensiunea maximă de serviciu kV_{ef}	Curentul nominal A	Curentul de închidere pe scurtcircuit kA_{ef}	Curentul limită termic de 1 s kA_{ef}	Curentul limită dinamic (valoare de vîrf) kA
6			100	10	10	25
6	6	7,2	200	10	10	25
6			400	10	10	25
10			100	10	10	25
10	10	12	200	10	10	25
10			400	10	10	25
20			100	10	10	25
20	20	24	200	10	10	25
20			400	10	10	25

[1]) Conform STAS 8087-68.

9.2.3. Separatoare [2])

Separatoarele sînt aparate care, atunci cînd sînt deschise au o distanță de izolare și se comută cu curent practic nul, sau se folosesc pentru comutare de curenți, dacă acest lucru nu produce o modificare importantă a tensiunii dintre contacte.

[1]) Condițiile generale ale separatoarelor de sarcină de interior de înaltă tensiune sînt stabilite în STAS 8087-68.
[2]) Condițiile generale ale separatoarelor de curent alternativ pentru tensiuni de 1 kV și peste 1 kV sînt stabilite în STAS 1564-62 (în curs de revizuire).

Tabelul 9.23. **Curenţi caracteristici ai separatoarelor în poziţia închis**[1])

Tensiunea nominală kV	Curentul nominal kA	Curentul limită termic timp de 1 s kA_{ef}	Curentul limită dinamic (valoare de vîrf) kA
3 (1)	200 – 400	10	25
	630 – 1250	30	75
	2000 – 3150	50	125
6	200 – 400	10	25
	400 – 1250	15	38
	630 – 1250	30	75
	630 – 1600	40	100
	2000 – 3150	50	125
10	200 – 400	10	25
	400 – 630	15	38
	630 – 1250	20	50
	1250 – 2000	30	75
	2000 – 3150	50	125
(15) 20 (25)	200 – 400	10	25
	400 – 630	10	25
	630 – 1250	20	50
	1250 – 2000	30	75
	2000 – 3150	40	100
35	200 – 400	10	25
	400 – 630	10	25
	630 – 1250	20	50
	1250 – 1600	30	75
(60)	630 – 1250	15	38
	1250 – 1600	30	75
110	630	15	38
	800 – 1250	20	50
	800 – 1250	30	75
220	800	10	25
	800 – 1250	15	38
	1250 – 1600	20	50

[1]) Conform STAS 1564-62.

9.2.4. Siguranţe de înaltă tensiune cu mare putere de rupere (siguranţe ITMPR [1])

Siguranţele ITMPR sînt aparate care servesc la întreruperea unei căi de curent cu ajutorul topirii anumitor părţi (conductoare fuzibile) sub influenţa căldurii generate de propriul lor curent, în cazul în care curentul depăşeşte o anumită valoare, un anumit timp (corespunzător caracteristicii timpului de topire). Siguranţele ITMPR cuprind

[1]) Clasificare şi terminologie pentru siguranţe fuzibile de înaltă tensiune sînt stabilite în STAS 4262-67

piese ce se pot schimba împreună cu conductorul fuzibil. Ele conţin piesa de contact, mediul de stingere şi carcasa.

Valorile nominale sînt: tensiunea nominală, frecvenţa nominală, curentul nominal de rupere (simetric sau asimetric), curentul nominal de trecere, curentul nominal de şoc, frecvenţa naturală nominală, factorul de amplitudine nominal. Curentul nominal de trecere este valoarea momentană maximă a curentului în timpul întreruperii. În cazul siguranţelor limitatoare de curent, curentul de trecere este considerabil mai mic decît valoarea de vîrf a curentului de scurtcircuit neamortizat.

Capacitatea de rupere

Tabelul 9.24. **Curenţi nominali de rupere ai patroanelor siguranţelor ITMPR corelaţi cu curenţii nominali şi tensiunile nominale corespunzătoare**

Curentul nominal A	Curentul de rupere nominal ($\cos \varphi = 0{,}15$), kA — La tensiuni nominale de 3 kV	6 kV	10 kV	20 kV	30 kV
6	75	75	75	30	30
10	75	75	75	30	30
16	75	75	75	30	30
25	75	75	75	30	25
40	75	75	75	30	20
63	75	65	60	—	—
100	75	65	60	—	—
150	75	65	—	—	—
200	75	30	—	—	—

[1]) Tip Siemens, denumite în germană siguranţe HH.

Curenţi limită

Tabelul 9.25. **Curenţi nominali de trecere pentru un curent alternativ de scurtcircuit I''_k de 10 kA (i_{D10}) în funcţie de curentul nominal**

Curent nominal, A	6	10	16	25	40	63	100	150	200
Curent nominal de trecere i_{D10}, kA	0,707	1,33	1,9	3,23	5,43	7,58	12,4	16	18,5

Pentru orice alte valori ale curenţilor alternativi de scurtcircuit I''_k, curentul nominal de trecere se calculează din relaţia $i_D = f \times i_{D10}$. În această relaţie, coeficientul f se ia din fig. 9.9 pentru valoarea de vîrf a curentului de scurtcircuit corespunzător.

Atunci cînd două elemente fuzibile ITMPR funcţionează în paralel, curentul nominal de trecere i_D se calculează prin înmulţirea valorii corespunzătoare unui element fuzibil cu 1,6.

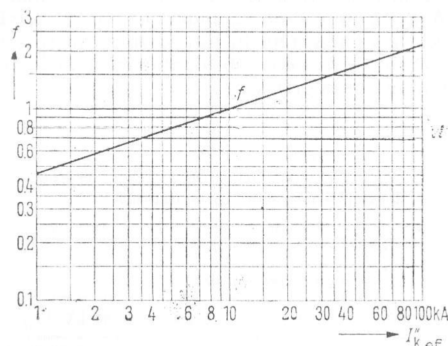


Fig. 9.9. Variaţia factorului f în funcţie de curentul de scurtcircuit I''_k.

Caracteristicile timpului de topire

Caracteristica timpului de topire a unui fuzibil reprezintă timpul echivalent de topire t_s în funcţie de curentul neamortizat I, care determină topirea fuzibilului

$$t_s = \frac{1}{I^2}\int_0^{t_s} i^2 \, dt$$

în care: i este curentul de scurtcircuit, în A;
t_s — timpul de topire, în s.

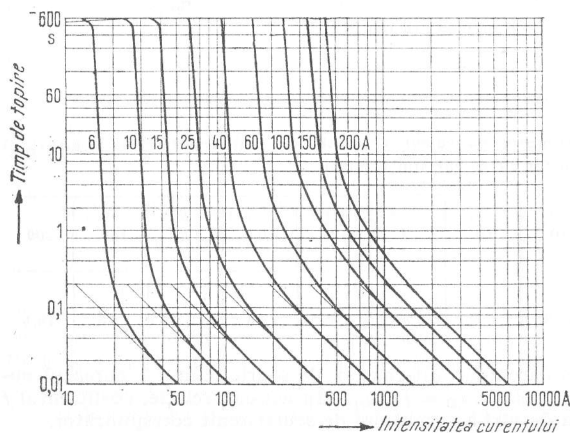


Fig. 9.10. Caracteristicile timpului mediu de topire (pentru curent se admite o toleranţă de ± 12%).

Tabelul 9.26. **Alegerea patroanelor fuzibile ale siguranţelor ITMPR pentru protecţia împotriva scurtcircuitelor a transformatoarelor trifazice, atunci cînd nu se pun condiţii de selectivitate**

Puterea nominală a transformatorului (trifazică)	Tensiune de lucru					
	3 kV	6 kV	10 kV	15 kV	20 kV	30 kV
	Curentul nominal al patronului fuzibil al siguranţei ITMPR					
kVA	A	A	A	A	A	A
20	16	10	6	6	6	6
30	25	10	10	6	6	6
50	25	16	10	10	6	6
75	40	25	16	10	10	6
100	40	25	25	16	10	10
125	63	40	25	16	16	10
160	63	40	25	25	16	10
200	100	40	40	25	25	16
250	100	63	40	25	25	16
315	100	63	40	40	25	25
400	150	63	63	40	40	25
500	150	100	63	40	40	25
630	200	100	63	40	40	25
800	2 × 150	150	100	2 × 25	40	25
1000	2 × 150	150	100	2 × 40	2 × 25	40

Selectivitate

Selectivitatea înseamnă întreruperea porţiunii defecte a liniei într-o măsură limitată la minimum; elementele sănătoase ale circuitului rămîn în funcţiune şi nu sînt separate de sursa de alimentare cu energie.

O bandă de toleranţe îngustă a curbei caracteristice precum şi o stingere eficace a arcului asigură o bună selectivitate reciprocă a patroanelor fuzibile ale siguranţelor ITMPR.

Tabelul 9.27. **Patroane fuzibile ITMPR şi JTMPR cu funcţionare selectivă utilizate în partea de înaltă tensiune şi de joasă tensiune a transformatoarelor**

Puterea nominală a transformatorului (trifazică)	Înaltă tensiune (ÎT)						Joasă tensiune (JT)		
	3 kV	6 kV	10 kV	15 kV	20 kV	30 kV	231 V	400 V	525 V
	Curent nominal al patroanelor fuzibile ale siguranţelor ITMPR						Curent nominal al patroanelor fuzibile ale siguranţelor JTMPR		
kVA	A	A	A	A	A	A	A	A	A
20	16	10	6	6	6	6	50	25	25
30	25	10	10	6	6	6	80	50	36
50	40	16	10	10	6	6	100	63	63
75	40	25	16	16	10	10	200	100	80
100	63	40	25	16	16	10	224	160	100
125	63	40	25	25	16	10	250	200	125
160	100	40	40	25	16	16	425	224	160
200	100	63	40	25	25	16	500	250	224
250	100	63	40	25	25	16	600	355	250
315	150	100	63	40	40	25	—	425	355
400	200	100	100	—	40	25	—	500	425

9.2.5. Echipament de protecție împotriva supratensiunilor [1])

Pentru protejarea instalațiilor electrice împotriva deteriorărilor produse de undele de supratensiune se folosesc descărcătoare cu rezistență variabilă. Eficacitatea descărcătorului ca aparat de protecție depinde în mod special de tensiunea sa de amorsare și de tensiunea sa remanentă, precum și de distanța de la punctul în care este instalat pînă la aparatul ce trebuie protejat.

Tensiunea nominală U (tensiunea de stingere) a descărcătorului este tensiunea care definește descărcătorul și la care sînt raportate caracteristicile de lucru. Ea este tensiunea cea mai mare de frecvență normală la descărcător, la care curentul de însoțire mai poate fi încă întrerupt și în același timp este tensiunea de lucru maximă admisibilă la descărcător.

Tabelul 9.28. **Caracteristicile descărcătoarelor catodice cu rezistență variabilă (descărcătoarele catodice sînt de tip supapă[1])**

Domenii de aplicație principale	Tensiunea de stingere — tensiunea nominală maximă kV	Tensiunea de amorsare de frecvență industrială kV	Tensiunea de amorsare 100% la impuls kV	Tensiunea reziduală la curentul nominal de descărcare kV	Curentul nominal de descărcare de impuls și forma de undă standardizată	Curentul de descărcare de impuls de lungă durată și durata curentului	Curentul maxim de impuls și forma de undă
Instalații mici	7,2 12 18 24	12— 14,5 22— 24 33— 36 44— 48	26 40 60 80	24 40 60 80	5 kA 8/20 μs	100 A 1000 μs	65 kA 4/10 μs
Instalații mijlocii	12 24 36	22— 25 44— 50 66— 75	40 80 120	38 76 114	10 kA 8/20 μs	200 A 200 μs	100 kA 4/10 μs
Instalații de înaltă tensiune	36 72 132 180 216	55— 65 115—125 200—220 270—300 325—360	105 170 280 380 455	102 204 374 510 612	10 kA 8/20 μs	400 A 2000 μs	100 kA 4/10 μs
Instalații de foarte înaltă tensiune	216 264 360	324—360 396—440 540—600	510 620 850	570 695 950	10 kA 8/20 μs	1000 A 2000 μs	150 kA 4/10 μs
Mașini rotative și rețele de cabluri	7,2 12 14,4 24	11— 12 18— 20 22— 24 36— 40	17 29 34 57	25,5 42 51 84	10 kA 8/20 μs	150 A 2000 μs	100 kA 4/10 μs

Tensiunea de amorsare la frecvența industrială U_{aw} (valoare efectivă) este tensiunea de vîrf împărțită la $\sqrt{2}$ la care se produce amorsarea la creșterea tensiunii de curent alternativ de frecvență industrială.

[1]) Clasificare și terminologie pentru aparatele de protecție contra supratensiunilor sînt stabilite în STAS 3999-67.

Tensiunea de amorsare 100% la impuls u_{as100} este valoarea de vîrf a celei mai mici tensiuni de impuls 1,2/50 [1]) la descărcător, care mai produce amorsarea descărcătorului.

Tensiunea reziduală u_r este valoarea maximă a tensiunii la descărcător în timpul circulației curentului de descărcare.

Curentul nominal de descărcare i_{sn} este valoarea de vîrf a impulsului de curent 8/20 [2]) pe care descărcătorul este dimensionat să-l poată stinge.

Curentul maxim de impuls este valoarea de vîrf a curentului de impuls 4/10[3]) pe care descărcătorul îl poate suporta de două ori într-un minut fără a suferi deteriorări.

Curentul de descărcare de impuls de lungă durată este un impuls de curent cu o formă de undă aproape dreptunghiulară, pe care descărcătorul îl poate suporta de 20 de ori consecutiv fără a suferi deteriorări.

9.3. APARATE ELECTRICE DE MĂSURAT [4])

Tabelul 9.29. **Domenii de aplicație ale aparatelor de măsurat de curent continuu**

Galvanometru cu oglindă	×	×	×	×	×	×	×											
Ampermetru cu amplificator			×	×	×	×	×	×	×									
Galvanometru cu spot luminos				×	×	×	×											
Aparat cu spot luminos						×	×	×	×	×								
Înregistrator continuu cu amplificator fotoelectric ..						×	×	×										
Galvanometru cu indicator ..						×	×	×	×	×								
Potențiometru						×	×	×	×	×	×	×	×	×				
Aparat de panou magnetoelectric cu șunt inclus						×	×	×	×	×	×	×	×	×				
Înregistrator continuu cu amplificare cu circuit oscilant								×	×									
Înregistrator discontinuu							×	×	×	×	×	×						
Oscilograf cu fascicul luminos cu șunt						×	×	×	×	×	×	×	×					
Înregistrator continuu cu șunt închis									×	×	×	×	×	×				
Aparat de panou cu magnet mobil cu șunt închis									×	×	×	×	×					
Aparat de panou cu magnet mobil									×	×	×	×	×	×				

[1]) Durata frontului de undă 1,2 μs, durata spatelui semiundei 50 μs.
[2]) Durata frontului de undă 8 μs, durata spatelui semiundei 20 μs.
[3]) Durata frontului de undă 4 μs, durata spatelui semiundei 10 μs.
[4]) Condițiile generale pentru aparatele de măsurat electrice indicatoare sînt stabilite în STAS 4640-61

Tabelul 9.29 (continuare)

Aparat de precizie cu magnet mobil											×	×	×					
Aparat de precizie magnetoelectric cu șunt exterior										×	×	×	×	×	×			
Aparat de panou magnetoelectric cu șunt exterior														×	×	×		
Aparat de panou cu magnet mobil cu șunt exterior														×	×	×		
Înregistrator continuu cu șunt exterior														×	×	×		
Transformator de măsură de curent continuu															×	×	×	
Juguri de curent mare																×	×	×
A	10^{-12}			10^{-9}			10^{-6}			10^{-3}			1			10^{3}		10^{6}

Tabelul 9.30. Domenii de aplicație ale aparatelor de măsurat de tensiune continuă

Galvanometru cu oglindă				×	×	×	×	×	×	×								
Galvanometru cu spot luminos							×	×	×	×								
Potențiometru							×	×	×	×	×	×	×	×	×			
Înregistrator continuu cu amplificator fotoelectric								×	×	×								
Galvanometru cu indicator								×	×	×								
Voltmetru cu amplificator								×	×	×	×	×						
Aparat cu spot luminos									×	×	×	×						
Înregistrator continuu cu amplificare cu circuit oscilant										×	×	×						
Aparat de panou magnetoelectric										×	×	×	×	×	×			
Oscilograf cu fascicul luminos cu rezistență										×	×	×	×	×	×			
Înregistrator discontinuu										×	×	×	×	×				
Aparat de precizie magnetoelectric cu rezistență serie exterioară											×	×	×	×	×			
Aparat de panou cu magnet mobil											×	×	×	×	×			
Înregistrator continuu												×	×	×	×			
Aparat electrostatic cu tensiune auxiliară în circuitul de ac sau cadran													×	×				

Tabelul 9.30 (continuare)

Aparat de panou cu magnet mobil													×	×	×			
Aparat de precizie cu magnet mobil cu rezistență serie exterioară													×	×	×			
Aparat electrostatic în conexiune idiostatică														×	×			
Aparat de panou cu bobină mobilă cu divizor de tensiune exterior															×	×		
Eclator cu sfere																×	×	×
V	10^{-12}			10^{-9}			10^{-6}			10^{-3}			1			10^{3}		10^{6}

Tabelul 9.31. Domenii de aplicație ale aparatelor de măsurat de curent alternativ

Indicator de nul electronic			×	×	×	×	×	×										
Galvanometru cu spot luminos cu redresor				×	×	×	×											
Oscilograf cu fascicul luminos, direct și prin traductor						×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
Aparat de panou magnetoelectric cu redresor									×	×	×	×	×					
Aparat de precizie cu magnet mobil									×	×	×	×	×					
Aparat de panou cu magnet mobil cu legătură directă									×	×	×	×	×	×				
Ampermetru cu amplificator										×	×	×						
Oscilograf catodic direct și prin traductor										×	×	×	×	×	×	×	×	
Potențiometru complex										×	×	×	×	×				
Aparat magnetoelectric cu termocuplu										×	×	×	×	×				
Înregistrator continuu cu indicator magnetoelectric și redresor										×	×							
Înregistrator continuu cu indicator magnetoelectric și redresor, prin transformator de măsură												×	×	×	×	×	×	
Aparat de măsurat magnetoelectric cu redresor, prin transformator de măsură													×	×	×	×	×	
Aparat de precizie cu magnet mobil prin transformator de măsură de precizie													×	×	×	×		

Joasă frecvență

Tabelul 9.31 (continuare)

Joasă frecvență	Aparat de panou cu magnet mobil, prin transformator de măsură													×	×	×	×	×	
Joasă frecvență	Înregistrator continuu cu indicator electrodinamic prin transformator de măsură													×	×	×	×	×	
Audiofrecvență	Oscilograf cu fascicul luminos								×	×	×	×	×						
Audiofrecvență	Aparat de panou magnetoelectric cu redresor									×		×	×	×					
Audiofrecvență	Ampermetru cu amplificator										×	×	×						
Audiofrecvență	Înregistrator continuu, cu indicator de măsură magnetoelectric și redresor										×	×							
Audiofrecvență	Oscilograf catodic, direct și prin traductor										×	×	×	×	×	×			
Audiofrecvență	Potențiometru complex										×	×	×	×	×				
Audiofrecvență	Aparat magnetoelectric cu termocuplu										×	×	×						
Audiofrecvență	Aparat de panou magnetoelectric, cu redresor, direct și prin transformator de măsură											×	×	×	×	×			
Audiofrecvență	Înregistrator cu indicator magnetoelectric și redresor, direct și prin transformator de măsură												×	×	×	×			
Înaltă frecvență	Oscilograf catodic prin transformator de măsură de înaltă frecvență										×	×	×	×	×				
Înaltă frecvență	Aparat magnetoelectric cu termocuplu prin transformator de măsură de înaltă frecvență										×	×	×	×	×				
Înaltă frecvență	Aparat magnetoelectric cu diodă semiconductoare și transformator de măsură de înaltă frecvență										×	×	×	×	×				

A 10^{-12} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 1 10^{3} 10^{6}

Tabelul 9.32. Domenii de aplicație ale aparatelor de măsurat de tensiune alternativă

Joasă frecvență	Indicator de nul electronic					×	×												
Joasă frecvență	Oscilograf cu fascicul luminos, direct sau prin transformator de măsură									×	×	×	×	×	×	×	×	×	
Joasă frecvență	Oscilograf catodic, direct sau prin transformator de măsură										×	×	×	×	×	×			

Tabelul 9.32 (continuare)

Joasă frecvență	Galvanometru cu spot luminos cu redresor										×	×	×	×					
Joasă frecvență	Oscilograf cu jet lichid												×	×	×	×	×		
Joasă frecvență	Aparat magnetoelectric cu redresor, prin rezistență serie											×	×	×	×	×	×		
Joasă frecvență	Aparat de panou cu magnet mobil											×	×	×	×	×			
Joasă frecvență	Voltmetru cu amplificator												×	×	×	×			
Joasă frecvență	Aparat cu magnet mobil cu termocuplu												×	×	×	×	×		
Joasă frecvență	Aparat de precizie cu magnet mobil, prin transformator de măsură															×	×	×	
Joasă frecvență	Înregistrator cu bobină mobilă și redresor													×	×	×			
Joasă frecvență	Aparat de precizie cu magnet mobil													×	×	×			
Joasă frecvență	Aparat electrostatic													×	×	×			
Joasă frecvență	Înregistrator continuu cu indicator electrodinamic														×	×			
Joasă frecvență	Aparat de panou cu bobină mobilă, cu redresor prin transformator de măsură															×	×	×	
Joasă frecvență	Aparat de panou cu magnet mobil															×	×	×	
Joasă frecvență	Înregistrator cu indicator electrodinamic prin transformator de măsură															×	×	×	
Joasă frecvență	Înregistrator cu bobină mobilă și redresor															×	×	×	
Joasă frecvență	Eclator cu sfere																×	×	×
Joasă frecvență	Aparat de măsurat tensiuni de vîrf (amplitudini)																×	×	×
Audiofrecvență	Oscilograf cu fascicul luminos direct sau prin transformator de măsură								×	×	×	×	×	×	×	×	×		
Audiofrecvență	Oscilograf catodic, direct sau prin transformator de măsură									×	×	×	×	×	×	×			
Audiofrecvență	Potențiometru complex										×	×	×	×	×				
Audiofrecvență	Aparat cu bobină mobilă cu redresor, prin rezistență serie											×	×	×	×	×	×		
Audiofrecvență	Voltmetru cu amplificator												×	×	×	×			

Tabelul 9.32 (continuare)

Audiofrecvență	Aparat termic cu bobină mobilă, cu termocuplu												×	×	×	×	×		
	Înregistrator cu bobină mobilă și redresor													×	×	×			
	Aparat electrostatic													×	×	×			
	Aparat de panou cu bobină mobilă cu redresor prin transformator de măsură ..															×	×	×	
	Înregistrator cu bobină mobilă și redresor prin transformator de măsură															×	×	×	
	Eclator cu sfere.																×	×	×
Înaltă frecvență	Oscilograf catodic										×	×	×	×	×	×			
	Aparat cu bobină mobilă cu diodă semiconductoare ..												×	×	×	×			
	Aparat cu bobină mobilă cu termocuplu												×	×	×	×			
	Aparat electrostatic													×	×	×			
	Eclator cu sfere																×	×	×

V 10^{-12} 10^{-9} 10^{-9} 10^{-6} 1 10^{3} 10^{5}

Tabelul 9.33. Domenii de aplicație și domenii de frecvență ale aparatelor de măsurat curenți și tensiuni alternative

Mărimea măsurată	Aparatul de măsurat	Utilizabil în ¹) J.F. 1 la 10^3 Hz	A.F. 10^2 la 10^4 Hz	Î.F. 10^4 la 10^6 Hz
Valoare efectivă	Aparat cu magnet mobil	×		
	Aparat electrodinamic	×		
	Aparat cu bobină mobilă cu termocuplu termic	×	×	×
	Aparat electrostatic	×	×	×
Valoare medie aritmetică	Aparat cu bobină mobilă cu redresor ..	×	×	
Valoare maximă (amplitudine)	Aparat de măsurat pentru tensiuni maxime (amplitudini de tensiune)	×		
	Eclator cu sfere	×	×	×
	Vectormetru	×		
	Oscilograf cu fascicul luminos..........	×	×	
Conținut de armonice	Aparate pentru măsura armonicelor	×		
	Oscilograf cu fascicul luminos	×	×	×
	Oscilograf catodic	×	×	
Forma curbei	Vectormetru	×		
	Oscilograf cu fascicul luminos..........	×	×	
	Oscilograf catodic	×	×	×

Tabelul 9.34. Domenii de frecvență ale aparatelor de măsurat factorul de putere

Tipul aparatului	Utilizabil în J.F.	A.F.	Î.F.
Aparat electrodinamic	×		
Potențiometru complex	×	×	
Vectormetru	×		
Oscilograf cu fascicul luminos	×	×	
Oscilograf catodic.....................	×	×	×

Tabelul 9.35. Domenii de aplicație ale aparatelor de măsurat frecvența

Aparatul de măsurat	Utilizabil în J.F.	A.F.	Î.F.
Aparat cu lame vibrante	×		
Aparat electrodinamic	×	×	
Tahodinam............................	×	×	
Punte de măsură	×	×	
Oscilograf cu fascicul luminos	×	×	
Oscilograf catodic.....................	×		
Linie de transport (sistem Lecher)			×

Tabelul 9.36. Domenii de frecvență ale aparatelor de măsurat

Tipul aparatului	C.C.	J.F.	A.F.	Î.F.
Aparat cu bobină mobilă.........................	×			
Aparat cu magnet mobil	×			
Aparat electrodinamic	×	×		
Ampermetru bimetalic	×	×		
Aparat cu magnet mobil	×	×		
Aparat cu lame vibrante		×		
Oscilograf cu fascicul luminos	×	×	×	
Aparat cu bobină mobilă cu redresor		×	×	
Aparat cu bobină mobilă cu diodă semiconductoare..		×	×	
Aparat cu bobină mobilă cu termocuplu	×	×	×	×
Aparat electrostatic	×	×	×	×
Oscilograf catodic	×	×	×	×

¹) J.F. — joasă frecvență; A.F. — audiofrecvență; Î.F. — înaltă frecvență; C.C. — curent continuu

Tabelul 9.37. Clasificarea aparatelor de măsurat

Clasa de precizie	Eroarea ε		Clasa de precizie	Eroarea ε	
0,1	± 0,1	Aparate de precizie	1	± 1,0	Aparate de măsurat industriale
0,2	± 0,2		1,5	± 1,5	
0,5	± 0,5		2,5	± 2,5	
			5	± 5,0	

ε este eroarea de măsurare admisibilă în %. Ea este egală cu diferența dintre valoarea indicată și valoarea reală a mărimii măsurate în procente față de valoarea cea mai mare a domeniului de măsură.

Tabelul 9.38. **Simboluri pentru indicarea aparatelor de măsurat**

	Pentru curent continuu
	Pentru curent continuu şi alternativ
	Pentru curent alternativ [1])
	Pentru curent trifazic cu un dispozitiv de măsurare
	Pentru curent trifazic cu două dispozitive de măsurare
	Pentru curent trifazic cu trei dispozitive de măsurare
1,5	Clasa de precizie, raportată la valoarea maximă a domeniului de măsură
1,5	Clasa de precizie raportată la lungimea scării sau lăţimea de înregistrare
1,5	Clasa de precizie raportată la valoarea exactă
	Cu cadran vertical
	Cu cadran orizontal

Tabelul 9.38 (continuare)

60°	Cu cadran înclinat faţă de orizontală (cu indicarea unghiului de înclinare)
2	Tensiune de încercare în kV
	Şunt exterior
	Rezistenţă adiţională
	Ecranare magnetică (ecran de fier)
	Ecranare electrostatică
ast	Măsurători astatice
	Referire la un document ataşat aparatului
	Semnul de prevenire pentru înalta tensiune
	Suspensie prin bandă elastică (semn sub simboluri, standard propriu Siemens)
	Aparat magnetoelectric cu cadran mobil

Tabelul 9.38 (continuare)

	pe lîngă	Redresor cu semiconductor
		Termocuplu neizolat exterior
		Termocuplu izolat inclus în aparat
	Logometru magnetoelectric	
	Aparat cu magnet mobil	
	Logometru cu magnet mobil	
	Aparat feromagnetic	
	Logometru feromagnetic mobil	
	Aparat electrodinamic (fără fier)	
	Logometru electrodinamic (fără fier)	
	Aparat ferodinamic (cu miez de fier)	
	Logometru ferodinamic (cu miez de fier)	

Tabelul 9.38 (continuare)

	Aparat de inducţie
	Logometru de inducţie
	Aparat termic
	Aparat bimetalic
	Aparat electrostatic
	Aparat cu lame vibrante
Sch e	Tip protejat contra incendiilor. Tip de protecţie „cu siguranţă sporită" [1])
Ex e G1	Tip protejat contra exploziilor. Tip de protecţie „cu protecţie sporită". Categoria de inflamabilitate G1[1])

50 1,5 50/5A 1000/100V 2

Exemplu: Aparat pentru curent trifazic, 50 Hz, cu două dispozitive de măsurare electrodinamice cu miez de fier, clasa de precizie 1,5; utilizare în poziţie verticală; tensiune de încercare 2 kV; legare prin transformator de măsură; curent nominal primar 50 A; curent nominal secundar 5 A; tensiune nominală primară 1000 V; tensiune nominală secundară 100 V.

[1]) Cînd nu se indică altă frecvenţă, domeniul nominal de frecvenţă este de 45–65 Hz.

Tabelul 9.39. **Reprezentarea aparatelor şi dispozitivelor electrice de măsură în scheme de circuite**

	Aparat indicator, reprezentare generală
	Aparat indicator cu un echipaj pentru măsurarea produsului [1])
	Aparat indicator cu un dispozitiv pentru măsurarea raportului [1])
	Aparat de măsurat, reprezentare generală pentru aparat indicator
	Aparat de măsurat, reprezentarea generală a aparatului indicator cu zero la mijloc
	Aparat de măsurat, reprezentare a aparatului indicator
	Ampermetru, indicaţie în A
	Ampermetru, cu un echipaj, indicaţie în A [1])
	Voltmetru pentru măsurări în curent continuu şi curent alternativ, indicaţie în V

Tabelul 9.39 (continuare)

	Aparat de măsurat diferenţe de tensiuni, cu un echipaj
	Wattmetru pentru sistem trifazic cu patru conductoare pentru orice fel de sarcină, cu trei echipaje (căile de curent în serie), indicaţia în W [1])
	Aparat înregistrator, reprezentare generală
	Aparat înregistrator, reprezentarea înregistrării continue
	Aparat înregistrator, reprezentarea înregistrării prin puncte
	Aparat înregistrator, reprezentarea înregistrării prin afişare numerică
	Apatat înregistrator, reprezentarea înregistrării prin perforare
	Wattmetru înregistrator pentru sistem trifazic cu trei conductoare pentru orice fel de sarcină, cu două echipaje (căile de curent în serie) indicaţie în W[1])

Tabelul 9.39 (continuare)

Ω	Punte pentru măsurarea rezistenţelor cu aparat inclus **cu zero la mijloc**
	Aparat integrator, în special contor
kWh	Contor pentru sistem trifazic cu trei conductoare pentru orice fel de sarcină cu două echipaje

*) Numai atunci cînd este necesar a se face o distincţie, circuitul de tensiune este reprezentat cu grosime simplă, iar circuitul de curent este figurat cu grosime dublă.

9.4. TRANSFORMATOARE DE MĂSURĂ ŞI CONTOARE

9.4.1. Transformatoare de curent şi de tensiune [1])

Transformatoarele de măsură reduc valorile de lucru (curentul primar sau tensiunea primară) printr-un raport de transformare fix la o valoare potrivită pentru aparatele de măsurat şi în acelaşi timp izolează circuitul de măsură de circuitul de înaltă tensiune. **Transformatoarele de curent** funcţionează ca transformatoare cu înfăşurările secundare aproape scurtcircuitate. Materialul feromagnetic din care este făcut miezul determină caracteristicile de măsură şi curentul de saturaţie. Atunci cînd în circuitele transformatoarelor de măsură se leagă contoare şi aparate de măsurat este de dorit ca valoarea curentului de saturaţie să fie redusă ($5 < n < 10$, în afară de o precizie bună de măsurare), pentru a se asigura protecţia aparatelor, în cazul unui scurtcircuit. Spre deosebire de acest caz, dacă în circuitele transformatoarelor se leagă relee de protecţie, este necesar un înalt grad de proporţionalitate între curenţii primari şi curenţii secundari în zona de suprasarcină şi deci o valoare cît mai mare a curentului de saturaţie ($n > 10$). În cazul transformatoarelor cu mai multe miezuri, miezul pentru contoare, miezul pentru măsură şi miezul pentru protecţie au înfăşurări secundare separate. La transformatoarele de curent care au înfăşurarea principală reglabilă (numai începînd din clasa 10), raportul de transformare se poate modifica cu 1 : 2 în sarcină.

[1]) Condiţiile generale pentru transformatoarele de tensiune sînt stabilite în STAS 4323-62 iar pentru cele de curent în STAS 4324-62 (în curs de revizuire).

Tabelul 9.40. **Curenţi nominali primari standardizaţi pentru transformatoare de măsură, în A**

Nr.	Clasa	Transformator cu raport fix	Transformator cu raport 1 : 2 reglabil	Transformator cu raport 1 : 2 : 4 reglabil
1	0,5 la 45	5 10 100 1 000 10 000 15 150 1 500 15 000 20 200 2 000 20 000 30 300 3 000 30 000 400 4 000 40 000 50 600 6 000 60 000 75 800 8 000 80 000	2 × 5 2 × 10 2 × 15 2 × 25 2 × 50 2 × 75 2 × 100 2 × 150 2 × 200 2 × 300 2 × 400	
2	60		2 × 50 2 × 75 2 × 100 2 × 150 2 × 200 2 × 300	
3	110 şi 110 E precum şi 150 şi 150 E			4 × 50 4 × 100 4 × 150
4	220 şi 220 E precum şi 300 E			4 × 100 4 × 150 4 × 300
5	380 E			4 × 300

Tabelul 9.41. **Transformatoare de curent şi de tensiune**

Construcţia	Clasa de tensiune kV	Curentul nominal primar A	Utilizare
Transformator de curent, uscat, de dimensiuni reduse (fibră, masă plastică, porţelan)	0,5	> 1000	Instalaţii interioare
Sub formă de transformator tijă şi bară	0,5	200–3000	
Transformator de curent, uscat (porţelan)	0,5–3	> 1000	
Sub formă de transformator cu o singură spiră	0,5–3	100–2000	
Transformator de curent, uscat, transformator de trecere, transformator tip suport (porţelan, răşină turnată)	10– 30	5–1000	
Sub formă de transformator în izolator de trecere	10– 30	5– 800	
Transformator de trecere pentru bară	10– 30	750–6000	
Transformator de trecere pentru tijă	10– 20	100–4000	Instalaţii exterioare
Cu izolator de trecere capacitiv	60–110	800	
Transformator tip suport (porţelan cu izolaţie de ulei)	60–400	50–1200	

Tabelul 9.42. **Erorile transformatoarelor de curent în funcţie de clasa de precizie şi de curentul care trece prin înfăşurarea primară [1])**

Clasa de precizie	Curentul primar, în % din curentul nominal	Erorile tolerate	
		de curent %	de unghi minute
0,2	120–100 20 10	± 0,2 ± 0,35 ± 0,5	± 10 ± 15 ± 20
0,5	120–100 20 10	± 0,5 ± 0,75 ± 1,0	± 30 ± 40 ± 60
1	120–100 20 10	± 1,00 ± 1,50 ± 2,00	± 60 ± 80 ± 120
3	100– 50	± 3	–

[1]) Conform STAS 4324-62

Puterea nominală secundară a transformatoarelor de curent nu trebuie să fie depăşită. Valoarea normală pentru transformatoare de curent este de 15 VA. Sarcina secundară a transformatorului de curent în VA se determină cunoscînd puterea consumată de contoarele şi aparatele de măsurat legate în circuit şi puterea pierdută în conductoarele de legătură

$$P_2 = \frac{0{,}018\, l I_s^2}{A}$$

unde: l este lungimea (în buclă) a conductoarelor secundare, în m;
I_s — curentul secundar al transformatorului de curent, în A;
A — secţiunea conductorului secundar, în mm².

Terminologie

Curentul nominal I_N şi tensiunea nominală U_N sînt valorile mărimilor de măsurat primare şi secundare indicate pe placă. Sarcina este impedanţa (în Ω) aparatelor consumatoare legate în secundarul transformatoarelor de curent.

Sarcina nominală este sarcina transformatoarelor de curent dată în legătură cu limitele de eroare şi indicată pe placă. Puterea nominală este puterea aparentă a transformatoarelor de tensiune indicată în legătură cu limitele de eroare.

Valoarea nominală a curentului de saturaţie este multiplul curentului nominal primar la care, avînd sarcina nominală şi cos β = 0,8, eroarea de curent este de 10% (β este unghiul de defazare dintre curentul secundar şi tensiunea secundară).

Raportul de transformare nominal este raportul dintre valoarea nominală a curentului sau tensiunii primare şi a celei secundare. Curentul I_t este valoarea efectivă maximă a curentului primar (în kA) la care înfăşurarea secundară legată în scurtcircuit poate fi menţinută timp de 1 s fără a apărea o creştere inadmisibilă a temperaturii.

Curentul limită dinamic I_{din} este curentul de vîrf maxim care poate fi suportat de transformator fără deteriorări, înfăşurarea secundară fiind în scurtcircuit. În cazul transformatoarelor de curent tip tijă, $I_{din} = \infty$.

Eroarea de curent ε_i şi de tensiune ε_u reprezintă abaterea procentuală a valorii măsurate faţă de valoarea teoretică.

Unghiurile de defazare β, δ_i, δ_u reprezintă defazarea dintre valoarea de măsurat primară şi cea secundară (rotită cu 180°). β şi δ sînt pozitive dacă valoarea secundară este decalată înaintea celei primare.

Transformatoarele de tensiune funcţionează ca transformatoare în gol. Tensiunea de funcţionare variază numai în limite strînse. Aceste transformatoare trebuie să aibă o rigiditate dielectrică mare la supratensiuni de comutaţie şi atmosferice. Tensiunea lor nominală secundară este de obicei 100 V.

Tabelul 9.43. **Tipuri constructive de transformatoare de tensiune**

Construcţia	Clasa de tensiune kV	Utilizare
Transformator de tensiune de dimensiuni reduse (fibră, material plastic, răşină turnată)	0,3 — 3	Instalaţii interioare
Transformator de tensiune uscat cu izolaţie plină (porţelan, cuarţ, răşină turnată)	3 — 30	
Transformator cu izolaţie degresivă	pînă la 34	
Transformator de tensiune cu izolaţie plină cu ulei puţin	10 — 30	
Transformator cu izolaţie degresivă	pînă la 45	
Transformator de tensiune tip oală, izolator suport, în cascadă (cu izolaţie de ulei)	60 — 400	Instalaţii exterioare

Tabelul 9.44. **Erorile transformatoarelor de tensiune în funcţie de clasa de precizie [1])**

Clasa de precizie	Tensiunea primară	Erorile tolerate	
		de tensiune %	de unghi minute
0,2	(0,8–1,2) U_{1n}[2])	± 0,2	± 10
0,5	(0,8–1,2) U_{1n}	± 0,5	± 20
1	(0,8–1,2) U_{1n}	± 1	±40
3	(0,8–1,2) U_{1n}	± 3	–

[1]) Conform STAS 4323-62.
[2]) U_{1n} este tensiunea nominală primară.

Puterea nominală secundară a transformatoarelor de tensiune. Nu trebuie să fie depăşită valoarea normală de 45 VA. Sarcina secundară se obţine prin însumarea consumului de putere din circuitele de tensiune ale tuturor contoarelor şi aparatelor de măsurat. În plus, trebuie să se calculeze căderea de tensiune pe conductoarele de legătură cunoscînd curentul de sarcină rezultant şi rezistenţa circuitului. Această tensiune nu trebuie să depăşească 0,05% din tensiunea nominală. Tensiunea secundară nominală este $100/\sqrt{3}$ în cazul unui transformator cu izolaţie degresivă şi 100 V în cazul unui transformator cu izolaţie plină.

Tabelul 9.45. **Clase de tensiune**

U, kV	0,5	1	3	6	10	20	30	45	60	110	150	220	440
U_p,kV	3	10	27	33	42	64	86	119	152	262	350	505	900

Notă: U — clasa de tensiune, U_p — tensiunea de încercare a izolaţiei între înfăşurări, între înfăşurările primare şi secundare faţă de miezul de fier; tensiunea U_p se aplică timp de un minut.

Standardizare. Contoarele şi transformatoarele de măsură folosite pentru decontarea energiei trebuie să fie aprobate oficial, standardizate şi înregistrate.

9.4.2. Contoare [1]

Contoarele măsoară energia electrică furnizată prin punctul de transfer al energiei (punctul de măsurare).

Contoarele cu motor au un dispozitiv de măsurare rotativ care antrenează un mecanism înregistrator cu şase indicaţii numerice prin intermediul unui angrenaj demultiplicator. Viteza discului de măsurare (rotorul dispozitivului de măsurare) corespunde puterii instantanee, iar numărul de rotaţii al discului, transmis dispozitivului de măsurare, corespunde consumului de energie din timpul de referinţă. Contorul nu poate fi readus la zero; consumul este dat de diferenţa dintre cele două citiri ale contorului din perioada corespunzătoare de măsurare.

Contoarele statice au un dispozitiv de măsurare static. Pînă în prezent se execută numai contoare de amper-ore, care măsoară efectul de transport al curentului. Acestea sînt aşa-numitele contoare electrolitice. Cantitatea de gaz eliberată într-un tub de măsurare etalonat este proporţională cu cantitatea de electricitate care trece.

Datorită capacităţii limitate de contorizare a acestui dispozitiv, elementul de măsurare trebuie să fie răsturnat după citire, pentru a provoca revenirea gazului la anod.

Contoarele de curent alternativ pentru reţele de curent alternativ monofazat (cu două fire) sînt contoare de inducţie, al căror element de măsurare constă dintr-un sistem de antrenare, un magnet de frînare şi un rotor cu lagăre cu rubine. Sistemul de antrenare este constituit de un electromagnet cu o bobină de tensiune la care se aplică tensiunea barelor şi cu o bobină de curent prin care circulă curentul de sarcină. Fluxurile datorate curentului şi tensiunii induc în discul rotorului curenţi concentrici cu fluxul care le dă naştere producînd un cuplu (principiul Ferraris). Cuplul este maxim atunci cînd fluxul produs de bobina de tensiune este decalat cu 90° în urma fluxului produs debobina de curent. În cazul contoarelor de energie activă acest lucru se realizează printr-o „echilibrare de 90°", o compensare a circuitului magnetic.

Magnetul de frînare împreună cu discul rotorului acţionează prin curenţi turbionari ca o frînă în sens antagonist faţă de momentul de acţionare al discului contorului. Cuplul de frînare este proporţional cu viteza discului. Această frînare îmbunătăţeşte proporţionalitatea între viteza rotorului şi puterea consumată de receptor, deoarece reduce influenţa mărimilor perturbatoare, ca fluctuaţiile de tensiune şi de curent. Cacarcteristicile de măsură ale contoarelor de serie se definesc cu ajutorul curbei de eroare medie. Fiecare contor trebuie să se încadreze în limitele de eroare prescrise pentru întreg domeniul de măsură

[1]) Condiţiile generale privind contoarele electrice de curent alternativ de energie activă şi reactivă sînt stabilite în STAS 4198/1-67.

cuprins între 5% din puterea nominală şi puterea maximă. Raportul dintre puterea maximă şi puterea nominală se exprimă prin capacitatea de încărcare. În cazul curenţilor care depăşesc 60 A trebuie să se folosească un transformator de curent.

Tabelul 9.46. **Tipuri obişnuite de contoare.**

Capacitatea de încărcare %	Tensiunea nominală V	Curentul nominal A	Curentul maxim A	Puterea de pornire W	Puterea maximă W
300	220	10	30	11	6600
400	220	10	40	11	8 800
400	220	15	60	16,5	13 200
600	220	10	60	11	13 200

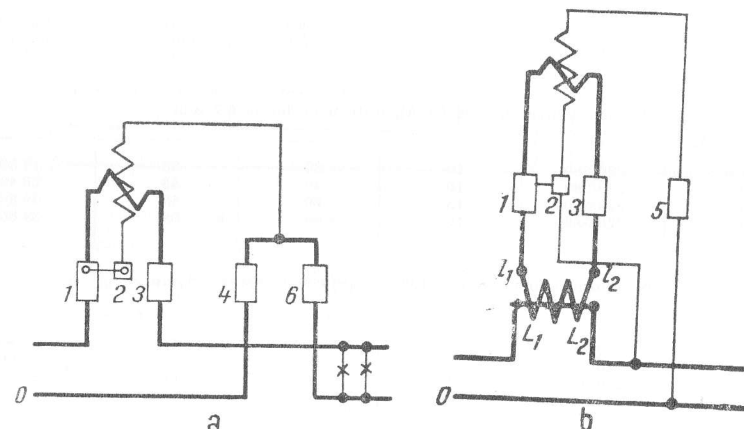


Fig. 9.11. Circuitele contoarelor:
a — pentru conectarea directă a unui contor monofazat; *b* — pentru conectare prin transformator de curent.

Borne

Orificii cu diametrul de 6,7 mm pentru conductoare cu secţiune de maximum 16 mm² şi în cazuri speciale şi pentru conductoare multifilare cu secţiunea de 25 mm².

Echipament pentru tarifare

Contor cu două tarife pentru măsurarea separată a consumului de energie în perioadele de tarif ridicat şi scăzut (curent de zi şi de noapte). Comutare prin comutator de timp separat sau sistem de comandă prin curenţi purtători.

Contoare trifazate

pentru reţele de curent alternativ polifazat (sisteme cu 3 şi 4 fire) acestea sînt contoare de inducţie, al căror dispozitiv de măsură constă din trei echipaje (R, S, T), sistemul de

frînare şi rotorul în lagăre cu pietre preţioase, care antrenează contorul. Contoarele au de regulă două discuri, influenţa mutuală a echipajelor fiind compensată prin legături convenabile ale circuitelor de tensiune şi printr-o anumită dispoziţie în spaţiu. Modul de funcţionare al echipajului de măsurare pentru curent trifazic este în esenţă acelaşi cu al contorului de curent alternativ monofazic. În cazul sistemelor trifazice cu trei conductoare (fără conductor neutru) şi în special în cazul legăturilor pentru înaltă tensiune, se poate folosi montajul Aron (schema cu două wattmetre). Dispozitivul de măsură are în acest caz numai două echipaje, cu compensare de 60°, pentru că sînt legate la I_R şi U_{RS} sau la I_T şi U_{TS}. Contoarele trifazice de energie reactivă sînt contoare cu diferite defazări în circuitul de tensiune (echilibrare de 180° şi de 60° între fluxurile de curent şi de tensiune).

Tabelul 9.47. **Mărimi nominale uzuale pentru contoare (conectare directă)**

Capacitatea de încărcare %	Tensiunea nominală V	Curentul nominal A	Curentul maxim A	Puterea de pornire W	Puterea maximă W
Tip mic (curent maxim 60 A), orificiu de bornă 6,7 mm					
300	220/380	10	30	33	19 800
400	220/380	10	40	33	26 400
400	220/380	15	60	50	39 600
600	220/380	10	60	33	39 600
Tip mijlociu (curent maxim 100 A), orificiu de bornă 8,5 mm					
400	220/380	20	80	66	52 800
400	220/380	25	100	83	66 000
600	220/380	15	90	50	59 400
Tip mare (curent maxim 150 A) orificiu de bornă 11 mm					
400	220/380	30	120	100	79 200
600	220/380	20	120	66	79 200
600	220/380	25	150	83	99 000

Tabelul 9.48. **Mărimi nominale uzuale pentru contoare (conectare prin transformatoare de măsură)**

Capacitatea de încărcare %	Tensiunea nominală V	Contor		Transformator		
		Curentul nominal A	Curentul maxim A	Curentul nominal A	Curentul maxim A	Clasa de precizie
400	220/380	1,5	6	5	6	0,5
400	/100	2,5	10	5	10	0,5 G
400	/100	1	6	5	6	0,5

Echipament pentru tarifare

Contor cu două tarife pentru măsurarea separată a consumului de energie în perioadele de tarif ridicat şi scăzut (energie consumată ziua şi noaptea). Contorul include două serii de mecanisme pentru înregistrare care sînt antrenate alternativ de rotor. Comutarea

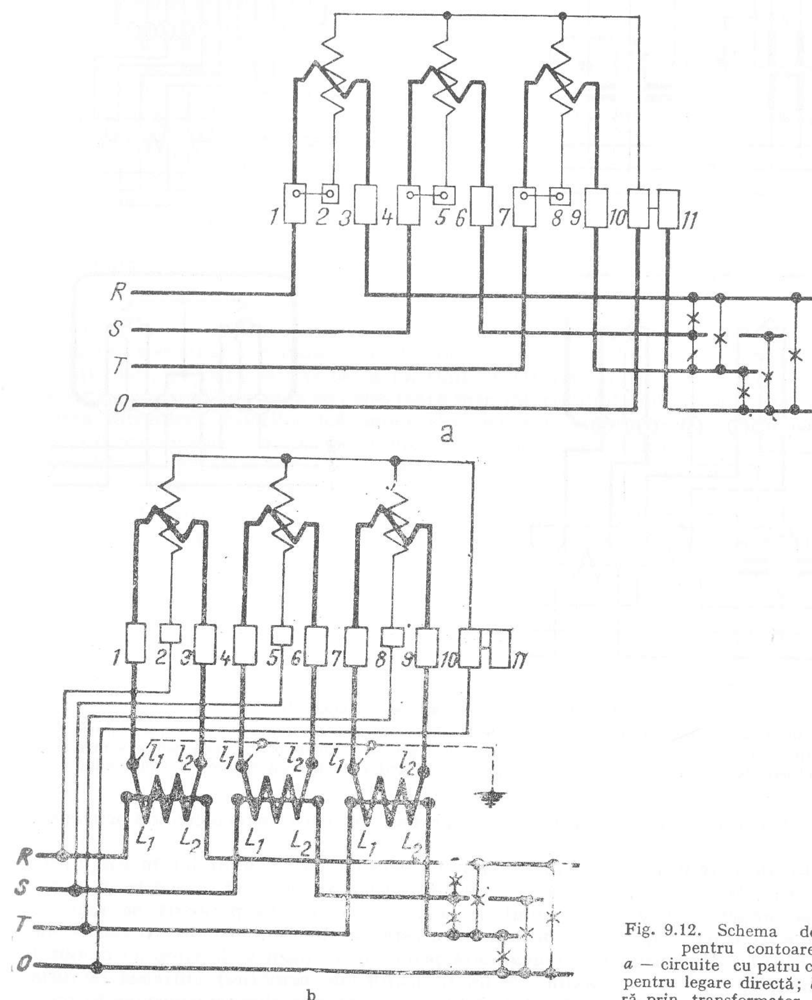


Fig. 9.12. Schema de legături pentru contoare [1]: *a* — circuite cu patru conductoare pentru legare directă; *b* — legătură prin transformator de curent.

[1]) Schemele electrice ale contoarelor pentru măsurat energia activă sînt stabilite în STAS 4198/2-68, iar pentru energie reactivă în STAS 4198/3-68.

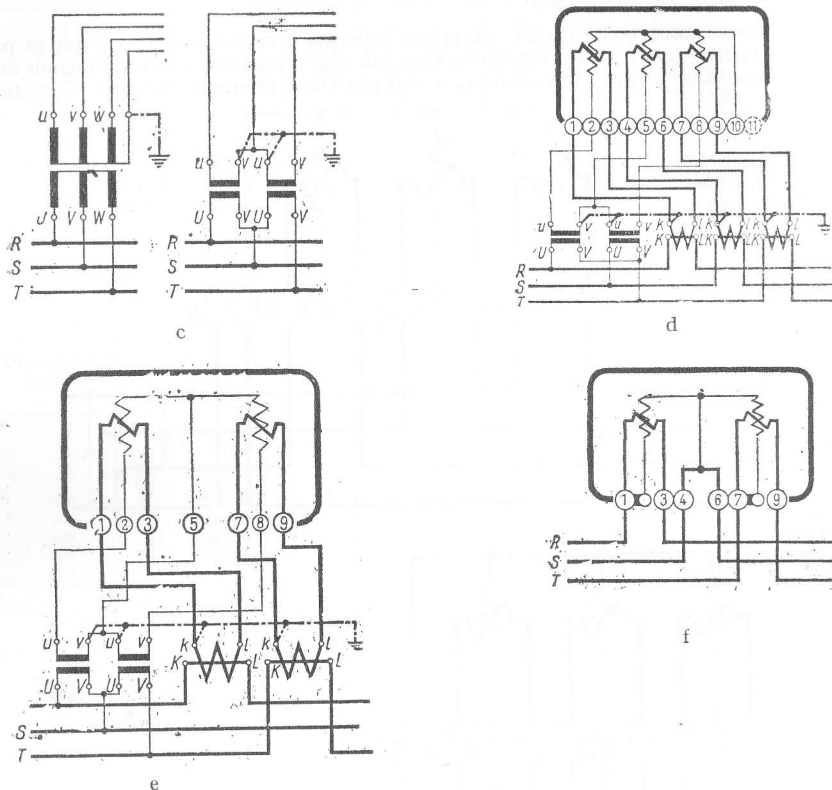


Fig. 9.12. Schema de legături pentru contoare:
c — mod de legare a transformatorului de măsură de tensiune; d — legarea contoarelor cu trei echipaje mobile prin transformatoare de curent şi tensiune; e — mod de legare a contoarelor cu două echipaje mobile prin transformatoare de curent şi tensiune; f — bornele unui contor pentru un sistem cu trei conductoare.

se efectuează printr-un comutator de timp separat sau prin sistem de comandă prin curenţi purtători.

Contor de maxim pentru indicarea puterii maxime care a avut loc în timpul perioadei de citire. Media se efectuează pe o durată de timp constantă, astfel încît puterea medie este proporţională cu consumul de energie din această perioadă de măsurare. În mod normal, o perioadă de măsurare este de 15 min, mai rar 30 sau 60 min. Durata perioadei de măsură este comandată printr-un dispozitiv de timp cu comutator de maxim. Dispozitivul de maxim are un indicator (de urmărire) antrenat de rotorul contorului. După trecerea perioadei de măsurare, acesta este eliberat şi revine în poziţia originală. Indicatorul de maxim este un ac antrenat, deplasat de indicatorul de urmărire şi care rămîne la valoarea maximă atinsă. Există şi dispozitive indicatoare de maxim

la care antrenarea dispozitivului indicator se realizează cu ajutorul unui motor auxiliar pentru a elibera contorul de efectuarea unui lucru mecanic, precum şi contoare cumulative care preiau deviaţia indicatorului de maxim cînd acesta este readus la zero la sfîrşitul perioadei de citire (1 lună).

Dispozitiv de pulsaţii

Pentru comanda echipamentelor de tarifare separate, de exemplu înregistratoare de maxim, imprimatoare de maxim sau perforatoare de maxim, există dispozitive care înregistrează valoarea puterii medii pe perioada de măsurare. Cartelele de înregistrare se extrag la sfîrşitul lunii. Pentru obţinerea maximului total se pot însuma datele unui număr de contoare de pulsaţii prin însumarea pulsaţiilor. Dispozitivele de pulsaţii montate în prezent în contoare funcţionează în mare măsură fără efect reactiv, adică fie folosesc un motor cu amplificare pentru acţionarea contactului de pulsaţii, fie contorul are un dispozitiv electronic de impuls inclus.

Contoare de curent continuu

Acestea sînt în mod aproape exclusiv contoare de amper-oră pentru măsurarea circulaţiei de curent sau integratoare de valori măsurate. Măsura circulaţiei de curent serveşte în special la comandarea unor procese electrochimice. În cazul aparatelor pentru curenţi mari, pe bară se montează un şunt de 60 mV (cădere de tensiune de 60 mV). Contorul de curent continuu se conectează prin intermediul unui amplificator de măsură. Pentru integrarea valorilor mărimilor electrice sau neelectrice măsurate, contorul de curent continuu este introdus în circuitul de măsură al unui transductor sau amplificator împreună cu aparatele indicatoare. Prin integrarea valorilor măsurate în mod analog se obţine cantitatea dorită. Pentru scopuri de dozare, contorul de cantitate are un alt contact de pulsaţii (contact de cantitate fixă) care comandă un contor de pulsaţii, iar acesta dă un impuls de comandă atunci cînd se atinge un număr predeterminat de pulsaţii.

Citirea contoarelor

Contoarele au elemente de numărare cu funcţionare continuă. Consumul de energie este dat de diferenţa dintre poziţiile înregistrate la începutul şi la sfîrşitul perioadei de citire. În cazul contoarelor pentru conectare directă, contorul indică energia în unităţile de măsură (kWh, kVarh şi Ah). În cazul contoarelor conectate prin transformatoare de măsură trebuie să se facă distincţie între dispozitivele de înregistrare primare, semiprimare şi secundare.

Dispozitivele de înregistrare primare indică energia în mod direct, exact ca şi cele pentru conectare directă. Rapoartele de transformare sînt cuprinse în constanta dispozitivului de înregistrare.

Dispozitivele de înregistrare semiprimare ţin seamă numai de tensiunea primară pentru constanta dispozitivului de înregistrare. Citirea acestuia trebuie să fie multiplicată cu raportul transformatorului de curent.

Dispozitivele de înregistrare secundare dau citiri care trebuie multiplicate atît cu raportul de transformare al transformatorului de curent cît şi cu raportul de transformare al transformatorului de tensiune (dar numai cu raportul transformatorului de curent în cazul reţelelor de joasă tensiune).

Rapoartele de transformare ale transformatoarelor sînt înscrise pe o placă suplimentară de mărimi nominale montată în exteriorul contorului.

Determinarea sarcinii instantanee a unui contor se face cu relaţia

$$P_{inst} = \frac{\text{număr de rotaţii citit } (n) \times 3\,600 \times 1\,000}{\text{constanta contorului } (k_c) \times \text{timpul de citire}}, \text{ în W}$$

Introducînd valoarea sarcinii nominale în relaţia de mai sus pentru $t_{teor} = 60$ s numărul nominal de rotaţii este:

$$u = n = \frac{k_c \times P}{60 \times 1\,000}$$

Reglementări

Contoarele care servesc la tarifarea energiei electrice furnizate trebuie să fie conforme standardelor şi certificatelor oficiale, adică trebuie să fie controlate de un birou de încercări electrice.

Limitele erorilor de etalonare pentru contoare de curent continuu:

P/P_N	0,05	0,1	0,5	1	1,25	P – sarcina măsurată în W
$\pm$ ε%	9	6	3	3	4	P_N – sarcina nominală în W

Pentru contoare de curent alternativ mono şi polifazat se poate folosi următoarea formulă:

$$\pm\,\varepsilon = 3 + 0{,}05\,\frac{P_N}{P} + 0{,}5\left(1 + 0{,}1\,\frac{P_N}{P}\right)\operatorname{tg}\varphi.$$

Pentru contoare legate prin intermediul transformatoarelor de măsură se poate folosi următoarea formulă:

$$\pm\varepsilon = 2 + 0{,}03\,\frac{P_N}{P} + 0{,}3\left(1 + 0{,}05\,\frac{P_N}{P}\right)\operatorname{tg}\varphi.$$

În cazul contoarelor de energie reactivă, Q_N este sarcina nominală reactivă, Q sarcina reactivă pentru acelaşi timp de citire, în Var s. În acest caz în formulă trebuie să se înlocuiască tg φ cu ctg φ.

În cazul contoarelor în condiţii de exploatare, limitele legale de eroare aplicabile sînt duble.

Determinarea erorilor la contoare

Metoda de încercare la sarcină de durată. Se compară indicaţia contorului cu cea a unui contor standardizat conectat în serie

$$\varepsilon = \frac{W - W_{teor}}{W_{teor}} \times 100\%,$$

unde: W este energia indicată de contor, în kWh;
W_{teor} – valoarea teoretică corespunzătoare (indicată de contorul standardizat fără eroare).

Metoda wattmetrului şi a cronometrului. Rotaţiile rotorului sînt măsurate cu un cronometru. În prezent acest lucru se realizează folosindu-se instalaţii de încercare cu comanda automată a sarcinii, cronometre electronice şi un dispozitiv de numărare care întrerupe în mod automat după un număr prestabilit de rotaţii ale rotorului.

$$\varepsilon = \frac{t_{teor} - t}{t} \times 100\,\% = \frac{u \times 3\,600 \times 1\,000}{k_c \times P}$$

unde: t_{teor} este timpul teoretic de încercare;
t – timpul măsurat;
u – rotaţiile numărate ale rotorului;
k_c – constanta contorului (numărul teoretic al rotaţiilor rotorului pentru 1 kWh);
P – sarcina în W, care trebuie să fie constantă în timpul efectuării măsurii.

Încercarea de funcţionare. Contoarele sînt conectate în serie cu un contor etalon de acelaşi tip, reglat în mod corespunzător. Contorul etalon este oprit după un număr prestabilit de rotaţii ale rotorului, de exemplu 10 sau 20. Eroarea de măsură a contorului se poate determina din poziţiile rotoarelor contoarelor şi din indicaţiile rotoarelor. Această metodă se foloseşte numai pentru contoare produse în serie pe scară largă.

Încercarea stroboscopică. Aceasta constă într-o comparare a vitezei contorului etalon cu cea a contorului de încercat. Cu ajutorul efectului stroboscopic, contorul etalon produce frecvenţa de bătăi. Marginea discului rotorului este divizată în 400 părţi. Această metodă se foloseşte în prezent în fabricaţie, în scopuri de reglaj.

Verificarea contorului la locul de montaj. Se foloseşte un contor portabil de etalonare legat în serie cu contorul de încercat. Contorul de etalonare are atît un indicator de energie cît şi un numărător separat de rotaţii. Contoarele de etalonare sînt executate, de obicei, pentru două domenii de tensiuni şi de curent.

PARTEA A TREIA

INSTALAȚII DE UTILIZARE A ENERGIEI ELECTRICE

10. TRACȚIUNEA ELECTRICĂ

10.1. GENERALITĂȚI

Ecartamentul liniilor de cale ferată

500 ... 750 mm	exploatări miniere, cariere de nisip, cariere de piatră, fabrici de cărămizi;
600 mm	căi ferate ușoare, căi ferate locale în: Brazilia, Bulgaria, R.D.G., R.F.G., Indonezia, Polonia;
610 mm	Australia, India, Republica Sud Africană
700 mm	Cuba, Indonezia;
750 mm	Argentina, Sahara spaniolă, Cuba, Ecuador, Egipt, Finlanda, R.D.G., R.F.G., Indonezia, Norvegia, Paraguay, Peru, Polonia, România, Turcia, U.R.S.S.;
762 mm	Austria, Bulgaria, Chile, Cuba, Cipru, Cehoslovacia, Ghana, India, Jugoslavia, Japonia, Nepal, Pakistan, Paraguay, San Domingo, Sierra Leone, Ungaria;
785 mm	Danemarca, Polonia;
891 mm	Suedia;
900 mm	exploatări de cărbune brun în Australia, R.D.G., R.F.G., Portugalia și România;
914 mm	Mozambic, Canada, Cuba, Filipine, Guatemala, Irlanda, Insula Man, Mexic, Panama, Peru, San Salvador, Suedia, Venezuela;
950 mm	Italia, Libia;
1000 mm	Guineea Bissau, Algeria, Argentina, Australia, Belgia, Birmania, Bolivia, Brazilia, Chile, China, Sahara spaniolă, Columbia, Egipt, Elveția, Etiopia, Franța, R.D.G., R.F.G., Grecia, Guyana, Italia, Luxemburg, Madagascar, Federația Malaysia, Pakistan, Peru, Polonia, Portugalia, Porto Rico, Spania, Tanzania, Thailanda, Togo, Tunisia, Uganda, Ungaria, Venezuela. Utilizat și pentru tramvaie;
1050 mm	Iordania, Siria, Tunisia;
1067 mm	Africa de Sud, Angola, Australia, Canada, Congo, Costa Rica, Ecuador, Filipine, Ghana, Guatemala, Guyana, Honduras, Indonezia, Japonia, Mozambic, Nicaragua, Nigeria, Norvegia, Noua-Zeelandă, Queensland (Australia), Rhodezia, Spania, Sudan, Suedia, Taiwan, Tasmania, U.R.S.S., Venezuela;

1100 mm	reţeaua de tramvaie în Brunswick, Kiel, Lübeck;
1435 mm (ecartament standard)	Argentina, Australia, China, Egipt, Europa (în afară de Irlanda, Portugalia. Spania şi U.R.S.S.), Franţa: 1500 mm distanţă între axele şinelor, este posibilă însă circulaţia cu ecartamentul standard al osiei montate) Arabia Saudită, Canada, R.P.D. Coreeană, Coreea de Sud, Cuba, Ecuador, Guyana, Iran, Irak, Izrael, Jamaica, Japonia, Liban, Manciuria, Maroc, Mauritania, Mexic, New South Wales, Paraguay, Peru, Tunisia, Turcia, Uruguay, S.U.A.: folosit şi pentru tramvaie;
1524 mm	Finlanda, Panama, U.R.S.S.;
1600 mm	Australia, Brazilia, Irlanda;
1665 mm	Portugalia;
1676 mm	Argentina, Ceylon, Chile, India, Pakistan, Spania.

Notarea formulei osiilor la vehiculele cu acţionare electrică

Osiile purtătoare succesive ale boghiului de susţinere sau ale şasiului principal sînt notate cu cifre arabe.

Osiile motoare succesive ale boghiului sau ale şasiului principal sînt notate cu litere mari latine.

În cazul *acţionării individuale a osiilor* se adaugă un zero mic la litera mare.

Dacă *aparatul de rulare este divizat*, numărul sau litera prin care se notează formula osiilor boghiului (de exemplu: boghiu purtător, boghiu motor, boghiu Bissel), este prevăzută cu accent.

Notarea formulei *osiilor boghiului* cu mai mult de o cifră sau o literă este pusă în paranteză.

La *vehicule cu unităţi motoare multiple* fără suprastructură, notaţiile care indică formula osiilor vehiculelor parţiale, sînt legate între ele cu semnul +.

Notaţii

1	o singură osie purtătoare;
1′	o singură osie purtătoare independentă de şasiul principal (de exemplu osia alergătoare);
2′	două osii purtătoare succesive independente de şasiul principal (de exemplu boghiu purtător);
Ao	o singură osie motoare;
Ao′	o singură osie motoare independentă de şasiul principal;
B	două osii motoare succesive, cuplate;
B′	două osii motoare succesive cuplate independente de şasiul principal (de exemplu boghiu motor);
Bo	două osii motoare succesive cu acţionare individuală;
Bo′	două osii motoare succesive cu acţionare individuală independente de şasiul principal (de exemplu boghiu motor);
C	trei osii motoare succesive cuplate;
C′	trei osii motoare succesive cuplate, independente de şasiul principal (de exemplu boghiu motor);
Co	trei osii motoare succesive cu acţionare individuală;
Co′	trei osii motoare succesive cu acţionare individuală independente de şasiul principal (de exemplu boghiu motor);

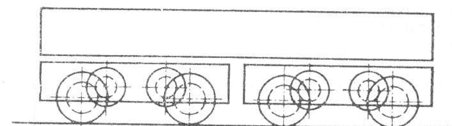
Notaţii

D	patru osii motoare succesive cuplate;
Do	patru osii motoare succesive cu acţionare individuală;
(1 Ao)	boghiu motor cu o singură osie purtătoare şi o singură osie motoare;
(A1A)	boghiu motor cu o singură osie purtătoare centrală şi două osii motoare cuplate;
(Ao1Ao)	boghiu motor cu o singură osie purtătoare centrală şi două osii motoare cu acţionare individuală;
(1B)	boghiu motor cu o singură osie purtătoare şi două osii motoare succesive cuplate;
(1Bo)	boghiu motor cu o singură osie purtătoare şi două osii motoare succesive cu acţionare individuală.

Exemple:

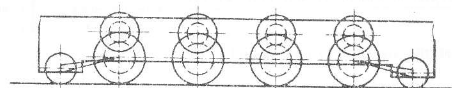
a) Bo′ Bo′

Locomotivă cu două boghiuri motoare, fiecare cu două osii motoare acţionate individual.



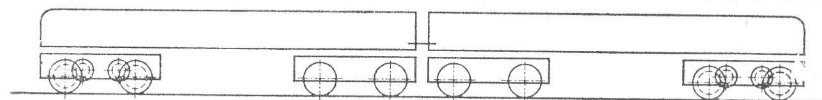
b) 1′ Do 1′

Locomotiva cu şasiul principal cu patru osii motoare succesive acţionate individual şi cîte o osie alergătoare la fiecare capăt.



c) Bo′ 2′ + 2′Bo

Automotor cu două unităţi, fiecare unitate avînd două boghiuri; un boghiu motor cu două osii acţionate individual şi un boghiu purtător cu două osii succesive.



T e n s i u n e a   n o m i n a l ă a sursei de energie la alimentarea prin linie de contact este de regulă cu 10% mai mare iar în unele cazuri cu 5% mai mare, decît tensiunea nominală a dispozitivelor consumatoare de energie.

Abaterea de durată admisă pentru tensiunea de lucru faţă de tensiunea nominală:

a) În sistemul de curent continuu la linia de contact între + 20% şi − 30% iar în curent alternativ monofazat între +15% şi −20%.

b) Pentru serviciile auxiliare ale vehiculelor cu alimentare în curent continuu de la linia de contact între +20% şi −30% şi de la reţele auxiliare speciale de alimentare între +20% şi −15%.

La alimentarea în curent alternativ monofazat prin transformator între +15% şi −30% faţă de tensiunea nominală.

Abaterea frecvenţei de lucru, de la frecvenţa nominală la alimentarea în 16 $^2/_3$ Hz de la +2% la −3%, iar la alimentarea în 50 Hz de ± 0,5%.

Tabelul 10.1. **Tensiuni nominale folosite şi felul curentului**

Tipul de cale ferată electrică	Felul curentului	Tensiunea nominală V
Vehicule cu baterii de acumulatoare pentru căi ferate miniere şi căi ferate suburbane	c.c.	72, 110, 440
Căi ferate miniere, căi ferate industriale, căi ferate miniere de suprafaţă		220, 600, 1200, 1500
Tramvaie, troleibuze		600, 750
Căi ferate interurbane, metrouri, căi urbane rapide, căi ferate suburbane		750, 1200, 1500
Căi ferate magistrale		1500, 3000
Căi ferate industriale, căi ferate miniere de suprafaţă, căi ferate suburbane, căi ferate magistrale	c.a. $16^2/_3$ sau 50 Hz	6000, 15000, 25000
Sistemul electric de iluminat	c.c.; c.a.	24, 110, 220
Dispozitive de comandă	c.c.; c.a.	24, 88, 110, 200, 220
Serviciile auxiliare ale vehiculelor	c.c.; c.a.	24, 110, 200, 220
Sisteme de încălzire a vehiculelor	c.c. c.a	corespunzător tensiunii liniei de contact 1 000 V, 1 500 V

Tabelul 10.2. **Greutăţi şi puteri ale locomotivelor şi vagoanelor motoare**

Tipul de cale ferată electrică	Tipul de construcţie conform sursei de alimentare şi sursei de energie	Formula osiilor	Greutatea Mgf	Putere nominală kW
a) *Locomotive*				
Căi ferate miniere, căi ferate industriale	Locomotive cu baterii de acumulatoare	Bo	4—35	10—100
Căi ferate industriale	Locomotive cu baterii de acumulatoare	Bo' Bo'	60—80	200—300
Căi ferate miniere, căi ferate industriale	Locomotive cu pantograf	Bo	6—50	35—500
Căi ferate din exploatări miniere de suprafaţă	Locomotive cu pantograf	Bo' Bo'	50—140	400—3000
Căi ferate magistrale cu trenuri de călători şi marfă	Locomotive cu pantograf	Bo' Bo'	64—80	1600—4000
Căi ferate magistrale cu trenuri exprese şi rapide	Locomotive cu pantograf	Bo' Bo' sau Co' Co'	80—120	2000—6000—7800

Tabelul 10.2 (continuare)

Tipul de cale ferată electrică	Tipul de construcţie conform sursei de alimentare şi sursei de energie	Formula osiilor	Greutatea Mgf	Putere nominală kW
Căi ferate magistrale cu trenuri grele de marfă	Locomotive cu pantograf	Co' Co' sau Bo'+Bo'+Bo'	120	2 000—4 400—7 800
Căi ferate industriale, căi ferate din exploatări miniere de suprafaţă	Locomotive cu pantograf	Bo'+Bo'+Bo'	120—150	1 100—1 800
b) *Vagoane motoare* [1])				
Tramvaie, căi ferate, interurbane	Vagon motor cu pantograf	B' B' sau Bo' Bo' B' 2' B' sau Bo' 2' Bo' B' 2'2' B' sau Bo' 2'2' Bo'	15— 30	200—300
Troleibuze	Vagon motor cu pantograf	1 Ao	7— 12	90—120
Căi ferate subterane, căi ferate urbane rapide	Vagon motor cu alimentare prin şină, vagon motor cu pantograf	B' B'+B' B' sau Bo' Bo'+Bo' Bo' sau Bo' Bo'+2'2'+ +Bo' Bo' [2])	40—120	400—1 200
Căi ferate magistrale	Vagon motor electric	Bo' 2'	50— 60	200
Căi ferate suburbane, căi ferate magistrale	Vagon motor cu pantograf	Bo' 2'+2' Bo' sau Bo' Bo'+2'2' sau Bo' 2+2'2'+ +2' Bo' [3]) sau Bo' Bo'+ Bo'Bo'+Bo'Bo'	60— 150	400—2 500

[1]) Inclusiv vagoane motoare cu unităţi multiple.
[2]) De exemplu: vagoane motoare de curent continuu cu trei unităţi pentru calea ferată urbană din Hamburg.
[3]) De exemplu: vagoane motoare de curent alternativ cu trei unităţi pentru traficul expres din Ruhr.

Gabaritul de liberă trecere pentru căile ferate electrice de ecartament standard[1]) în concordanţă cu construcţia căilor ferate şi regulamentelor de exploatare

Gabaritul de liberă trecere defineşte prin liniile B—C (fig. 10.1) spaţiul în al cărui interior afară de materialul rulant trebuie să nu intre nici o parte a construcţiilor şi instalaţiilor fixe şi este valabilă pentru linii drepte şi în curbe cu rază de 250 m sau

[1]) Valabil pentru ecartamentul standard german.

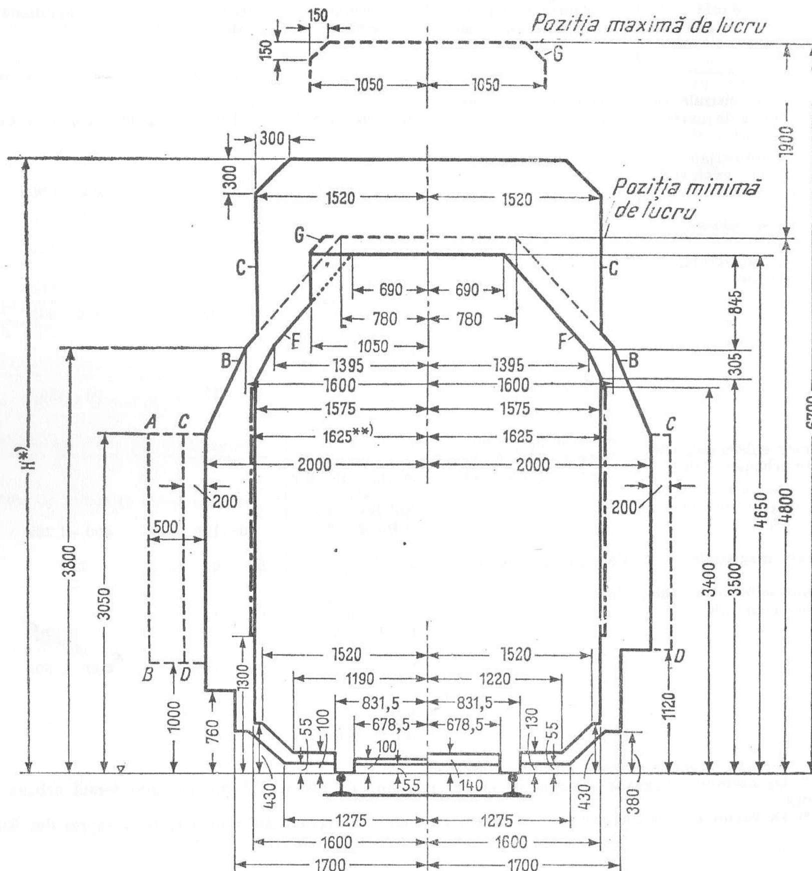


Fig. 10.1. Gabaritul de liberă trecere și gabaritul de material rulant:

A – B — zone laterale ce trebuie menținute libere pentru linia electrică aeriană, în afară de lucrările de construcție aferente; *C – D* — zone laterale ce trebuie menținute libere pentru stații și lucrări de construcții aferente ale liniei electrice aeriene; *H**) = 5500 mm pentru suprastructuri și tunele noi; *H* = 5300 mm pentru suprastructuri și tunele existente cînd tracțiunea cu abur este înlocuită cu tracțiunea electrică; **) pentru discuri și lămpi de semnalizare.

mai mare. În curbe cu rază mai mică de 250 m, gabaritul de liberă trecere, trebuie mărit în concordanță cu raza de curbură.

Cînd staționează în poziția centrală în aliniament, vehiculele trebuie să nu depășească conturul *F* din gabaritul pentru locomotive și vagoane. Lățimea maximă permisă trebuie astfel limitată încît să fie îndeplinite condițiile pentru deplasarea în curbele din linie curentă și curbele de la macazuri.

B/C stînga:	Gabaritul de liberă trecere pentru linii principale directe și linii de plecare și sosire pentru trenuri de călători.
B/C dreapta:	Același pentru celelalte linii.
F stînga:	Gabaritul pentru locomotive și automotoare.
F dreapta:	Gabaritul pentru vagoane.
G:	Gabaritul pentru pantografe la tensiune nominală de 15 kV, în poziția cea mai înaltă și cea mai joasă de funcționare.

Gabaritul de material rulant pentru liniile electrificate cu ecartament standard în conformitate cu fișa UIC-505

Nici o parte a vehiculului de ecartament standard nu trebuie să depășească dimensiunile de gabarit arătate în schița din fig. 10.2, în poziție de staționare sau în mișcare sau cînd supraînălțarea nu este mai mare decît 0,05 m dacă planul median longitudinal al vehiculului motor conține axa căii de ecartament standard de 1435 mm.

Pentru alte supraînălțări și în curbe sînt admise anumite toleranțe specificate de la caz la caz în fișele UIC. Săgeata de încovoiere a arcului pe verticală și pe orizontală, trebuie luată de asemenea în considerare.

Pentru părțile cele mai joase ale vehiculului motor este valabilă fig. 10.3.

La Căile Ferate Române, gabaritul de liberă trecere și gabaritul de material rulant este reglementat prin STAS 4392-68. În fig. 10.4 este reprezentat gabaritul de liberă trecere standardizat la CFR.

Pentru stabilirea dimensiunilor părții superioare ale gabaritului de liberă trecere pe liniile electrificate este necesară cunoașterea distanțelor de izolare electrică. La CFR, în condițiile utilizării sistemului de tracțiune electrică în curent monofazat 50 Hz — 25 kV, aceste distanțe se stabilesc conform fig. 10.5 și tabelului 10.3.

În general gabaritele standardizate sau cele utilizate în tracțiunea electrică la CFR sînt în concordanță cu prevederile fișelor UIC-505 și 606.

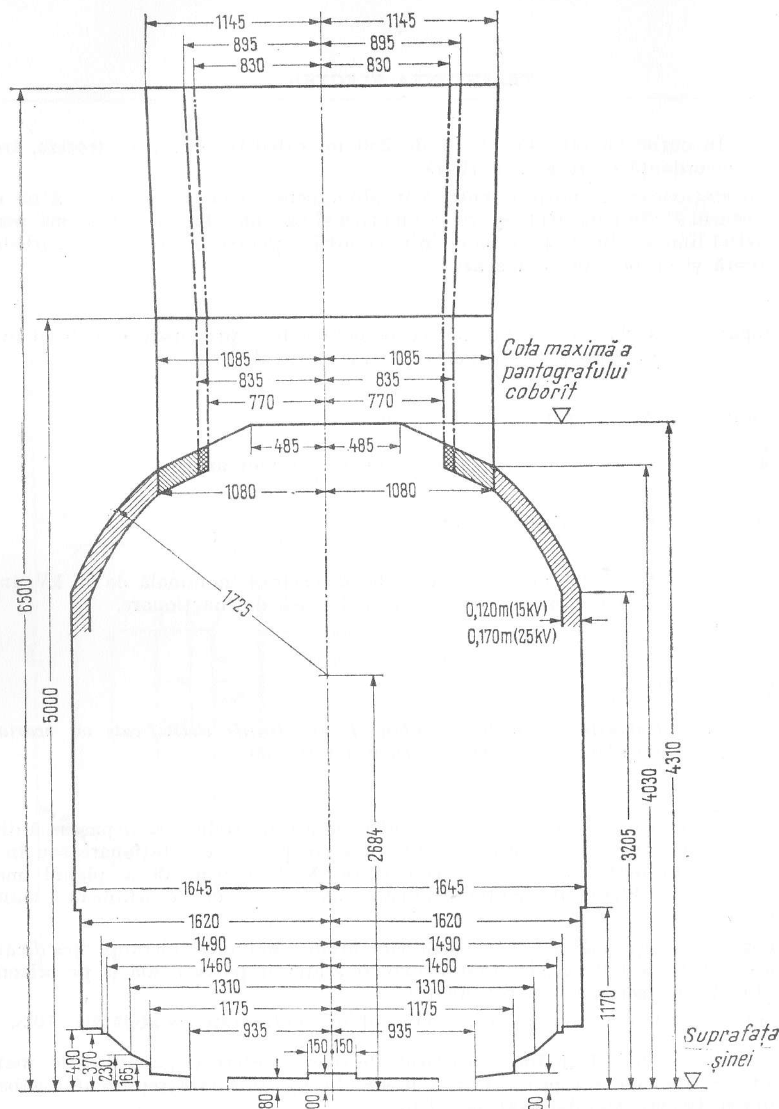


Fig. 10.2. Gabaritul provizoriu de material rulant pentru echipamentul de pe acoperișul unității de tracțiune ce poate fi utilizat în traficul internațional:

Spații ce trebuie menținute libere de elemente neizolate sub tensiune. Aceste părți trebuie distanțate de gabaritul liniei la minimum:
0,120 m pentru alimentarea cu 15 kV;
0,170 m pentru alimentarea cu 25 kV.

Gabaritul liniei pentru pantograf:
——— la o înălțime de 1,950 m
— · — la o înălțime de 1,450 m
— · · — la o înălțime de 1,320 m
Pantograf cu sau fără capete de furcă izolate.

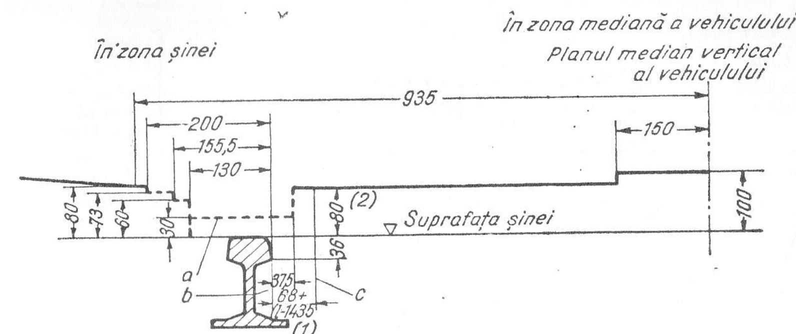


Fig. 10.3. Gabaritul de material rulant pentru părțile cele mai joase ale trenurilor cu unități multiple:
a — dimensiuni de gabarit ale părților vehiculului, cu excepția roților; *b* — lățimea maximă admisă a buzei de bandaj, luîndu-se în considerare înclinarea posibilă a osiei montate față de șină; *c* — poziția limită a părții interioare a bandajului roții, cînd osia montată este împinsă către șina opusă.
(1)*l* — ecartamentul.
(2) Notă: Cel mai scăzut nivel orizontal 80 mm deasupra coroanei șinei este valabil pentru zona cu boghiul la unități de tracțiune cu boghiuri și pentru zonele osiilor montate la unitățile de tracțiune fără boghiuri. În afara acestor zone părțile de vehicul nu pot fi coborîte la mai puțin de 100 mm deasupra coroanei.

Tabelul 10.3. **Distanțele minime de izolare**

Cazul	Distanțe de izolare *b* mm	Distanțe de izolare *c* mm	Condițiile în care se aplică
1	320	320	Cînd distanța minimă de izolare durează un timp îndelungat (cazul cînd locomotiva cu pantograful ridicat staționează sub lucrarea de artă și împinge suspensia în sus) dacă pe linia respectivă există circulație importantă de locomotive cu abur sau cînd lucrarea de artă și linia de contact sînt situate în zona marină (mediu salin)
2	270	270	Idem ca în cazul 1, însă nu există circulație importantă de locomotive cu abur sau cînd lucrarea de artă și linia de contact nu sînt situate în zona marină (mediu salin)
3	270	220	Cînd distanța minimă de izolare durează un timp scurt (cazul cînd locomotiva cu pantograful ridicat trece pe sub lucrarea de artă), dacă pe linia respectivă există o circulație importantă de locomotive cu abur sau cînd lucrarea de artă și linia de contact sînt situate în zona marină (mediu salin)
4	220	170	Idem ca în cazul 3, însă nu există circulație importantă de locomotive cu abur sau cînd lucrarea de artă și linia de contact nu sînt situate în zona marină (mediu salin)

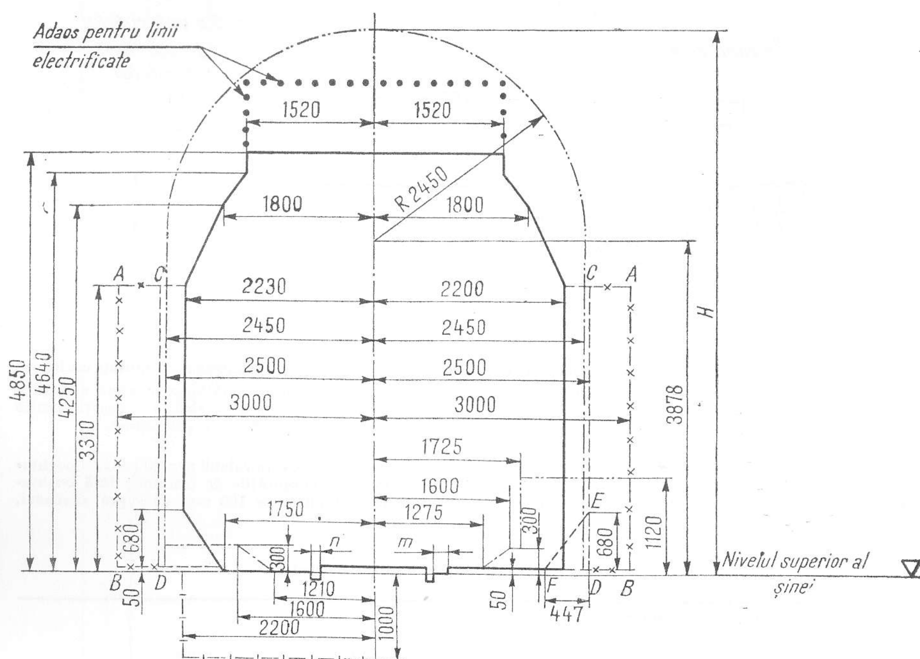


Fig. 10.4. Gabarit de liberă trecere pentru construcţii noi, valabil în aliniament şi în curbe cu raze mai mari de 4000 m:

a — în linie curentă;

———— Gabarit de construcţie pentru lucrări de artă noi

— — — *CD* spaţiu liber care trebuie respectat de infrastructura podurilor care traversează calea ferată cu lăţime sub 6 m, de parapetele podurilor, precum şi de semnalele instalaţiilor SCB (semnalizare, centralizare, bloc) şi stîlpii reţelei de contact [1])

— x — x — *AB* spaţiu liber care trebuie respectat de alte construcţii şi de ziduri paralele şi infrastructuri de poduri care traversează calea ferată, cu lăţimea de 6 m sau mai mare

— · — · — Limita de apropiere a peroanelor în haltele din linia curentă

— | — | — Spaţiu liber care trebuie asigurat pentru acţiunea maşinii de ciuruit balastul, cu excepţia lucrărilor de artă, trecerilor de nivel şi instalaţiilor SCB

· · — · · — Gabarit pentru tuneluri

b — în staţii (între vîrfurile macazurilor) şi pe porţiunea liniilor de tragere şi garaje care depăşeşte aceste macazuri (în afara staţiei);

———— Gabarit pentru semnale, coloane hidraulice, stîlpi de iluminat, precum şi stîlpii reţelei de contact plasaţi între linii

— · — · — Limita de apropiere a peroanelor, rampelor şi cheiurilor, aparatelor de manevră la macazuri şi semnalelor pitice

— — — *CD* spaţiul liber care trebuie respectat de infrastructura podurilor care traversează liniile şi de soclurile masive de siguranţă cu lăţimea sub 6 m

— — — *CEF* spaţiu liber care trebuie respectat de suprastructura podurilor metalice cu calea jos în staţii

[1]) Această dimensiune poate fi redusă în cazuri impuse de condiţiile locale între 2 500 şi 2 200 mm cu aprobarea anticipată a Conducerii Departamentului Căilor Ferate.

— x — x — *AB* spaţiu liber care trebuie respectat de alte construcţii, precum şi de ziduri paralele şi de infrastructura podurilor care traversează liniile şi de soclurile masive de siguranţă cu lăţimea de 6 m sau mai mare, stîlpii peroanelor sau stîlpii exteriori ai reţelei de contact

· · — · · — Gabarit pentru tuneluri

Notă: 1. Înălţimea liberă *H* sub o lucrare de artă sau construcţie situată pe o cale ferată electrificată se măsoară în axa căii de la nivelul superior al şinelor şi pînă la partea cea mai de jos a lucrării de artă. Această înălţime este determinată de:

— caracteristicile constructive ale lucrării de artă şi ale liniei de contact;

— tipul suspensiei catenare (rigidă, semicompensată, compensată, cu sau fără cablu purtător etc.);

— condiţiile meteorologice ale zonei în care se află construcţia;

— poziţia lucrării de artă pe traseul liniei (în linie curentă, în staţii de cale ferată, în apropiere de o trecere de nivel sau macaz);

— înălţimea minimă a firului de contact;

— asigurarea distanţei minime de izolare pe verticală (lama de aer — *b*), conform fig. 10.5;

— jocul pe verticală al suspensiei (variaţia săgeţii) datorită variaţiei de temperatură sau depunerii maxime de chiciură;

— nivelul definitiv al căii.

2. $m \geqslant 150$ mm pentru obiecte fixe nelegate de şina de rulare; $m \geqslant 135$ mm pentru obiecte rigide legate de şina de rulare; $n = 67$ mm + supralărgirea curbei la treceri de nivel, linii în pavaje etc.; 45 mm + supralărgirea curbei la contraşine lîngă firul interior în curbe; 44 mm la şanţul de rulare al inimilor simple; 41 mm $^{+2}_{-3}$ pentru contraşine care ghidează roata pe faţa interioară; 46 mm pentru contraşine la traversările fixe.

3. Conturul gabaritului în curbe cu raze de 4 000 m sau mai mici se stabileşte prin înclinarea gabaritului astfel ca după înclinare axa să fie perpendiculară pe planul tangent la ciupercile ambelor şine; lăţimile din gabaritul de mai sus se sporesc şi ele în acest caz conform reglementărilor STAS 4392-68.

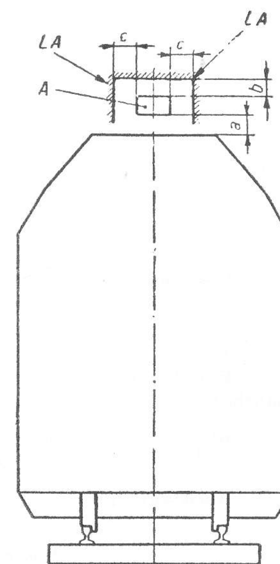


Fig. 10.5. Distanţa de izolare în tracţiunea electrică.

Notă: *A* reprezintă partea neizolată a liniei de contact şi a pantografului (inclusiv deplasările datorită jocurilor şi curbelor) aflate sub tensiune; *LA* — lucrare de artă.

10.2. VEHICULE MOTOARE

Calculul performanţelor

Ecuaţia forţei de tracţiune:

$$F_o = W_t = W_r + W_s + W_c + W_a = w_t G_{tren} = (w_r + w_s + w_c + w_a)\, G_{tren}$$

Rezistenţa principală la înaintare:

$$W_r = w_r\, G_{tren} = c_0 G_0 + (c_0 + c_1)\, G_a + (c_2 + c_3 n) \times 0{,}5\, \Omega \left(\frac{V + 15}{10}\right)^2.$$

Rezistenţa specifică a declivităţii:

$$w_s = \pm s$$

Rezistenţa specifică în curbe:

$$w_c = \frac{153 e + 100 a}{R}$$

La CFR se utilizează formulele lui Röckl:

— pentru $R < 250$ m: $$w_c = \frac{500}{R - 30}$$

— pentru $250 < R < 350$: $$w_c = \frac{530}{R - 35};$$

— pentru $R > 350$: $$w_c = \frac{650}{R - 55}$$

Rezistenţa specifică de accelerare:

$$w_a = \frac{1\,000\ (1 + \xi)\ a_a}{9{,}81}$$

$$w_a = 110\ a_a \quad \text{pentru un spor mediu} \quad \xi = 0{,}08$$

şi

$$w_a = 108\ a_a \quad \text{pentru un spor mediu} \quad \xi = 0{,}06.$$

Rezistenţa principală la înaintare pentru locomotive

$$W_L = c_0 G_0 + (c_0 + c_1)\, G_a + c_2 \cdot 0{,}5\, \Omega \left(\frac{V + 15}{10}\right)^2.$$

Rezistenţa principală la înaintare a trenurilor de călători (fără locomotivă) după Sauthoff:

$$W_{căl} = (1{,}9 + 0{,}0025\ V) \times G_V + 0{,}5\, c_3 \times (n + 2{,}7) \times \Omega \left(\frac{V + 15}{10}\right)^2.$$

Rezistenţa principală la înaintare a trenurilor de marfă:

$$W_{mar} = \left[2 + (0,007 + c_4) \left(\frac{V + 15}{10}\right)^2\right] G_V$$

La CFR se utilizează următoarele formule pentru calculul rezistenţei specifice principale.

Pentru locomotive Co' Co':

$$W_L = (150 + 1{,}2\ V + 0{,}03\ V^2)\ \frac{G_L}{120}$$

Pentru locomotive Bo' Bo'

$$W = (100 + 0{,}8\ V + 0{,}03\ V^2)\ \frac{G_L}{80}$$

Pentru trenuri de marfă:

— cu vagoane specializate:

$$W_{mar} = \left(1{,}6 + \frac{V^2}{2\,700}\right) G_V$$

— cu vagoane diferite (încărcate):

$$W_{mar} = \left(2 + \frac{V^2}{1\,950}\right) G_V$$

Pentru trenuri de călători:

$$W_{căl} = \left(2 + \frac{V^2}{3\,200}\right) G_V$$

În aceste relaţii s-au folosit notaţiile:

F_o — forţa de tracţiune la obadă, în kgf;
W_t — rezistenţa totală la înaintare, în kgf;
W_c — rezistenţa în curbă, în kgf;
W_s — rezistenţa declivităţii, în kgf;
W_a — rezistenţa de accelerare, în kgf;
W_r — rezistenţa principală la rulare, în kgf;
W_L — rezistenţa principală la înaintare pentru locomotive, în kgf;
$W_{căl}$ — rezistenţa principală la înaintare pentru trenuri de călători, în kgf;
W_{mar} — rezistenţa principală la înaintare pentru trenuri de marfă, în kgf;
G_{tren} — greutatea trenului, în tf;
G_V — greutatea vagoanelor, în tf;
c_0 — coeficientul de frecare de rostogolire şi alunecare a osiilor, în kgf/tf;
c_1 — coeficientul rezistenţei de frecare al mecanismului de acţionare, în kgf/tf;
c_2 — coeficientul rezistenţei la înaintare a vehiculului de tracţiune[1];
c_3 — coeficientul rezistenţei la înaintare a vagoanelor remorcate;
c_4 — coeficientul rezistenţei la înaintare a vagoanelor remorcate în trenurile de marfă (v. tabelul 10.4);
n — numărul vehiculelor remorcate;
Ω — suprafaţa frontală (suprafaţa geometrică a secţiunii transversale) a vehiculului;
V — viteza de circulaţie, în km/h;
R — raza de curbură, în m;

[1]) Pentru tunele coeficientul trebuie dublat.

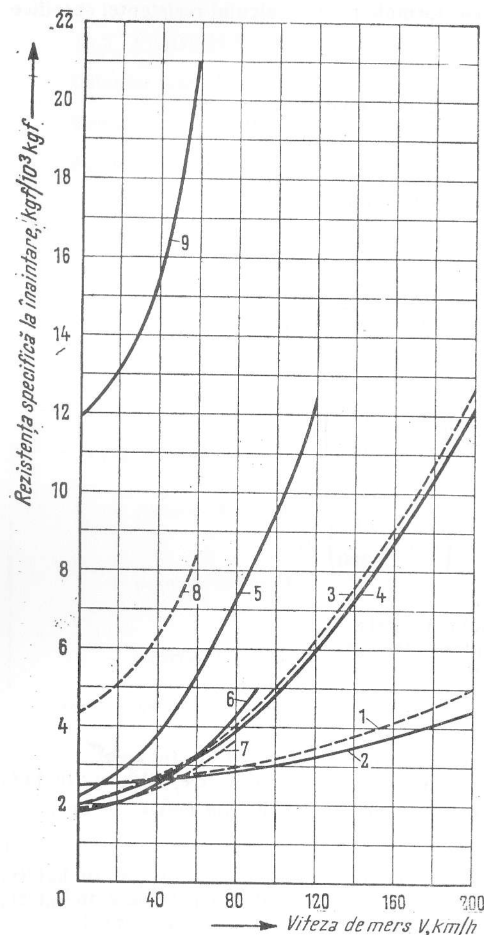


Fig. 10.6. Rezistența principală la înaintare:

1 — locomotive cu patru osii Bo' Bo' de 85 tf; *2* — locomotive cu șase osii Co'Co' de 112 tf; *3* — trenuri interurbane de 350 tf formate din 7 vagoane; *4* — trenuri rapide de 600 tf, formate din 13 vagoane; *5* — trenuri de marfă de 1200 tf; *6* — trenuri suburbane cu 2—3 unități motoare alimentate prin pantograf; *7* — trenuri urbane rapide cu 2—3 unități motoare alimentate prin șină conductoare; *8* — tramvaie formate dintr-un vehicul motor și o remorcă; *9* — troleibuze

a — valoarea medie a ampatamentului rigid la toate vehiculele cu $a < 3{,}3\ e$, în m;
a_a — accelerația de pornire, în m/s²;
s — declivitatea, în ‰;
w_t — rezistența specifică totală la înaintare, în kgf/tf;
w_c — rezistența specifică a curbei, în kgf/tf;
w_s — rezistența specifică a declivității, în kgf/tf;
w_a — rezistența specifică pentru accelerare, în kgf/tf;
w_r — rezistența specifică principală la înaintare, în kgf/tf;
G_a — greutatea aderentă, în tf;
G_0 — partea din greutatea locomotivei rezemată pe osiile libere, în tf;
G_L — greutatea totală a locomotivei, în tf;
e — ecartamentul, în m;
ξ — factor de creștere pentru masele în mișcare de rotație.

Forțe de tracțiune determinante

1. Forța de tracțiune la demaraj în palier și aliniament.
2. Forța de tracțiune necesară pentru mișcarea uniformă cu viteză redusă pe declivități lungi.
3. Forța de tracțiune la viteza maximă în palier și aliniament.

Forța de tracțiune a locomotivelor la demaraj este în general determinată de valoarea limită a coeficientului de aderență. Aceasta poate fi de pînă la trei ori mai mare decît cea din regim uniorar. Pentru automotoare forța de tracțiune la demaraj este determinată cu ajutorul accelerației maxime. Ea este în general de 1,4 — 2 ori valoarea de regim uniorar.

Forța de tracțiune a vehiculului motor la viteza maximă este determinată de accelerația finală impusă. Pentru trenuri remorcate de locomotive se ajunge la 0,15 m/s². Pentru automotoare accelerația finală este de 0,5—0,6 m/s².

Tabelul 10.4. **Coeficienții de rezistență**

Coeficientul de frecare de rostogolire și alunecare a osiilor	c_0 kgf/tf
Cuzinet cu metal antifricțiune și șine Vignole la căi cu ecartament standard și la linii de tramvai	1,5
Cuzinet exterior cu alunecare și șine Vignole la căi cu ecartament standard și la linii de tramvai	2
Cuzinet interior cu alunecare și șine Vignole la căi cu ecartament standard	2,5
Cuzinet cu metal antifricțiune și șine cu șanț la linii de tramvai	3
Cuzinet cu alunecare și șine cu șanț, la linii de tramvai	3,5
Căi ferate miniere de suprafață și căi ferate industriale cu ecartament standard	5—7
Căi ferate miniere de suprafață și căi ferate industriale cu ecartament de 900 mm	7—10
Căi ferate miniere cu ecartament de 600 și 750 mm	8—11
Căi ferate miniere cu ecartament de 500 mm	9—12
Linii fără șine în funcție de compoziția căii	10—16
Coeficientul rezistenței de frecare al mecanismului de acționare	**c_1 kgf/tf**
Acționare cu motoare semi-suspendate	2,0
Acționare cu articulații	2,0
Acționare elastică cu rotor sau arbore tubular	2,5
Acționare elastică cu inel de cauciuc	2,5
Acționare cu doi arbori longitudinali	2,5
Acționare cu ax cardanic	3
Acționare prin arbore intermediar cu trei osii cuplate	3
Acționare prin arbore intermediar a patru osii cuplate	4
Acționare cu ax cardanic și roți suspendate pe cauciuc	4
Coeficientul rezistenței aerului la vehicule motoare	**c_2 kgf/tf**
Locomotivă cu muchiile acoperișului rotunjite	0,6
Automotor cu o singură unitate sau remorcă înaintașă cu muchiile acoperișului rotunjite	0,6
Automotor cu două unități cu muchiile acoperișului rotunjite	0,65
Automotor cu trei unități cu muchiile acoperișului rotunjite	0,7
Automotor cu patru unități cu muchiile acoperișului rotunjite	0,8
Locomotivă cu muchiile acoperișului nerotunjite	0,8
Tramvaie, troleibuze	0,8
Automotor cu o singură unitate sau remorcă înaintașă cu muchiile acoperișului nerotunjite	0,8
Automotor cu două unități motoare cu muchiile acoperișului nerotunjite	0,9

Tabelul 10.4 (continuare)

Coeficientul rezistenţei aerului la vehicule remorcate	c_3 kgf/tf
Remorcă pentru automotoare cu muchiile acoperişului rotunjite	0,2
Remorcă pentru automotoare cu muchiile acoperişului nerotunjite	0,25
Automotor cu două unităţi cu muchiile acoperişului rotunjite	0,3
Automotor cu două unităţi cu muchiile acoperişului nerotunjite	0,4
Automotor cu trei unităţi cu muchiile acoperişului rotunjite	0,4
Vagoane de călători pe două şi trei osii	0,12
Vagoane cu patru osii pentru trenuri exprese	0,14
Adaos pentru pantograf	0,1
Coeficientul rezistenţei aerului pentru vagoane în trenurile de marfă	**c_4 kgf/tf**
Vagoane de marfă de mare capacitate	0,025
Trenuri de marfă compuse din vagoane diferite	0,05
Trenuri de marfă compuse din vagoane goale	0,2

Tabelul 10.5. Suprafaţa frontală a vehiculelor

Tipul de vehicul	Suprafaţa frontală m²
Locomotive de mare viteză	11,4
Locomotive pentru trenuri de călători şi marfă, automotoare de ecartament standard	10,5
Automotoare rapide	10,3
Tramvaie, troleibuze	7,2
Vagoane de călători	10
Vagoane de marfă	6–10

Puterea vehiculelor cu unităţi multiple este egală cu puterea uniorară a vehiculului motor, respectiv este egală cu suma puterilor uniorare ale motoarelor de tracţiune

$$P_h = \frac{F_h V_h}{367}$$

unde:

P_h este puterea uniorară, în kW;
F_h — forţa de tracţiune uniorară la arborele motor, în kgf;
V_h — viteza uniorară a motorului de tracţiune, în km/h.

Regimul uniorar al motoarelor de tracţiune corespunde regimului de oră admis din considerente termice şi la o anumită viteză de referinţă. Această viteză uniorară este aproximativ 35–40% din viteza maximă, în cazul motoarelor de tracţiune de curent continuu ale tramvaielor, metrourilor, vehiculelor rapide de pe liniile urbane şi suburbane, şi de 45–60% din viteza maximă pentru motoarele locomotivelor de curent continuu. Viteza de referinţă este determinată de excitaţia nominală prescrisă. Pentru motoarele de tracţiune ale vehiculelor de curent alternativ viteza uniorară reprezintă 70–100% din viteza maximă.

Forţa de aderenţă şi coeficientul de aderenţă:

$$F_{max} = F_a = G_a \mu$$

în care:

F_{max} este forţa maximă de tracţiune sau de frînare, în kgf;
F_a — forţa de aderenţă, în kgf;
G_a — greutatea aderentă, în kgf;
μ — coeficientul de aderenţă.

Tabelul 10.6. **Coeficienţii de aderenţă pentru vehicule motoare**

Starea şinelor	Valoarea medie a coeficientului de aderenţă μ
Şine uscate cu nisipare	1/3
Şine uscate fără nisipare	1/4
Şine umede fără nisipare	1/5
Şine alunecoase cu nisipare	1/6
Şine alunecoase fără nisipare	1/10
Cale uscată şi anvelope de cauciuc	1/2

Transformarea caracteristicilor motorului în caracteristici ale vehiculului

$$\frac{V}{n} = \frac{3{,}6\, D\pi}{60\, i}, \quad \frac{F_m}{M} = \frac{2zi}{D}, \quad F_o = F_m \eta_t$$

unde:

V este viteza de mers, în km/h;
F_m — forţa de tracţiune la arborele motorului, în kgf;
F_o — forţa de tracţiune la obadă, în kgf;

i este raportul de angrenare, de exemplu raportul dintre turația motorului și a osiei antrenate;
D — diametrul roții motoare, în m;
z — numărul motoarelor de tracțiune;
n — turația motorului, în rot/min;
M — cuplul motor, în kgf · m;
η_t — randamentul transmisiei mecanice;

Randamentul transmisiei mecanice este de aproximativ 0,97. Diametrul roții motoare trebuie luat la valoarea corespunzătoare bandajelor semiuzate; de exemplu în general cu valoarea nominală micșorată cu 35 mm pentru automotoare și cu 40 mm pentru locomotive.

Calculul diagramelor de mers

Diagrama de pornire, care reprezintă forța de tracțiune în funcție de viteza de mers, începe cu forța de tracțiune de demaraj a cărei valoare este limitată de aderență și de curentul maxim admisibil, și continuă la vehiculele de curent continuu la aceeași valoare pînă cînd intersectează curba forței de tracțiune ce corespunde situației cu motoarele în paralel și cîmp plin (excitație nominală), urmată de o scădere a forței de tracțiune de demaraj, pînă la intersecția cu curba forței de tracțiune pentru excitația minimă (cîmp slăbit). În curent alternativ la vehiculele cu unități multiple, după caz ea continuă pînă la 30 — 70% din viteza maximă, urmată de o scădere a forței de tracțiune de demaraj pînă la intersectarea curbei forței de tracțiune corespunzătoare treptei de tensiune maximă.

Ecuația dinamică fundamentală pentru determinarea timpului de mers este:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{(F_o - W_r - W_s)\,9{,}81}{(1 + \xi) \times 1000\,G_{tren}} = \frac{f - s}{110}\,[\mathrm{m/s^2}] = 118(f - s)\ [\mathrm{km/h^2}]$$

Pentru $\xi = 0{,}06$ coeficienții ecuației devin 108 și respectiv 120.

Timpul de mers și distanța parcursă pe secția de remorcare respectivă sînt calculate prin integrarea pe porțiuni a ecuației fundamentale cu ajutorul următoarelor relații:

Pornirea:

$$\Delta t_a = \frac{\Delta V}{3{,}6\,a_a}; \quad \Delta l_a = \frac{V_2 - V_1}{2}\,\Delta t_a$$

Mersul cu viteză constantă:

$$t_1 = \frac{l_1 \times 3{,}6}{V_1}$$

Încetinirea:

$$\Delta t_{inc} = \frac{110\,\Delta V}{3{,}6(w_r + w_s + w_m)}; \quad \Delta l_{inc}\ \frac{V_2 - V_1}{2}\,\Delta t_{inc}$$

Frînarea:

$$t_f = \frac{V_f}{3{,}6\,a_f}; \quad \Delta l_f = \frac{V_f}{2}\,t_f$$

Pe secția de remorcare:

$$T = t_a + t_1 + t_{inc} + t_f; \quad L = l_a + l_1 + l_{inc} + l_f$$

în care:

a este accelerația sau decelerația, în m/s²;
v — viteza de mers, în km/h;
f — forța specifică de accelerare în palier, în kgf/tf;
s — rezistența specifică a declivității, în kgf/tf;
a_a — accelerația de pornire, în m/s²;
a_f — decelerația de frînare, în m/s²;
ΔV — diferența de viteză, în km/h;
V_1 — viteza inițială, în km/h;
V_2 — viteza finală, în km/h;
V_l — viteza de mers, în km/h;
V_f — viteza la începutul frînării, în km/h;
Δt — interval de timp, în s;
t_a — timpul de pornire, în s;
t_l — timpul de mers cu viteză constantă, în s;
t_{inc} — timpul de încetinire, în s;
t_f — timpul de frînare, în s;
T — timpul total de mers, în s;
w_m — rezistența specifică de frecare a motoarelor de tracțiune în kgf/tf; rezistența de frecare se ridică la 1,5—2% din regimul uniorar;
Δl — intervalul de distanță parcursă, în m;
l_a — drumul de pornire, în m;
l_l — drumul parcurs cu viteza constantă, în m;
l_{inc} — drumul de încetinire, în m;
l_f — drumul de frînare, în m;
L — drumul total parcurs, în m.

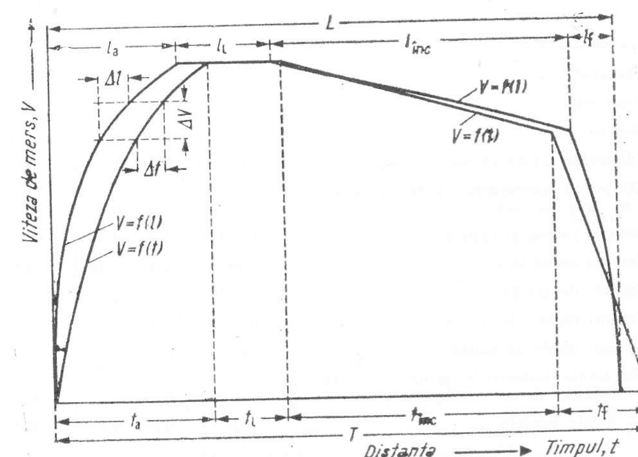


Fig. 10.7. Curbele de parcurs

Valoarea eficace a curentului:

$$I_e = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} I_k^2 \ \Delta t_k / T}$$

este proporțională cu solicitarea motorului.

Consumul de energie la pantograf se obține din următoarele ecuații:

$$A = \frac{U}{3\,600\,G_{tren}} \cdot \sum_{k=1}^{n} I_k \ \Delta t_k \quad \text{— pentru tracțiune în curent continuu}$$

$$A = \frac{U}{3\,600\,G_{tren}} \sum_{k=1}^{n} I_k \cos \varphi_k \ \Delta t_k \quad \text{— pentru tracțiune în curent alternativ,}$$

în care:

I_e este curentul eficace al motorului, în A;
I — curentul motorului sau curentul transformatorului, în A;
Δt — intervalul de timp, în s;
T — timpul total de parcurs, inclusiv timpul de oprire, în s;
A — energia consumată, raportată la unitatea de greutate a trenului, în Wh/tf;
a — energia specifică medie, în Wh/tf·km ($a = A/L$);
U — tensiunea rețelei, în V;
φ — defazajul dintre tensiune și curent.

Tabelul 10.7. **Valori caracteristice ale tracțiunii electrice**

Tipul tracțiunii electrice	Viteza maximă de exploatare km/h	Accelerația la pornire m/s²	Decelerația medie la frînare m/s²	Distanța medie între opriri km	Energia specifică medie la pantograf, S < 5‰ în Wh/tfkm
Tramvai	50– 70	0,8 –1,2	1,0	0,4–0,6	60– 90
Troleibuz	50– 60	0,8 –1,2	1,0	0,4–0,6	80–120
Metrou	50– 80	0,8 –1,2	1,0	0,6–1,2	60–100
Căi ferate rapide urbane	80–100	0,8 –1,0	1,0	0,8–1,5	60–100
Căi ferate interurbane cu trenuri exprese de lung parcurs	120–180 (200)	0,3 –0,5	0,6	100–200	20– 35
Trenuri rapide și exprese	100–160	0,25–0,35	0,5	50–100	20– 25
Trenuri de călători	140	0,3 –0,45	0,5	4– 5	25– 35
Trenuri de marfă directe și rapide	65–120	0,1 –0,2	0,25	40– 50	15– 20
Trenuri rapide de marfă [1])	120	0,1 –0,2	0,3	50–100	20– 25
Trenuri locale de marfă	60	0,1 –0,2	0,2	5	20– 25
Căi ferate industriale și din exploatări miniere de suprafață	50–70	0, 1–0,3	0,3	—	20– 30
Căi ferate miniere	15	0,05–0,1	0,2	—	15– 30

[1]) Folosind vagoanele de marfă cu frînă tip călători și o viteză de circulație de 100 km/h.

Tabelul 10.8. **Încălzirile maxime ale mașinilor electrice în condiții de încercare**

Nr. crt.	Izolație	Tipul de exploatare	Partea ce va fi încercată	Determinarea temperaturii cu ajutorul	Încălzirea maximă °C
1	Clasa A	Regim de durată	Înfășurările rotorului și statorului	Creșterea rezistenței	85
2			Colectorul	Termometru electric	100
3		Regim uniorar	Înfășurările rotorului și statorului	Creșterea rezistenței	100
4			Colectorul	Termometru electric	105
5	Clasa E	Regim de durată și regim uniorar	Înfășurările rotorului	Creșterea rezistenței	105
6			Înfășurările statorului		115
7			Colectorul	Termometru electric	105
8	Clasa B		Înfășurările rotorului	Creșterea rezistenței	120
9			Înfășurările statorului		130
10			Colectorul	Termometru electric	105
11	Clasa F		Înfășurările rotorului	Creșterea rezistenței	140
12			Înfășurările statorului		155
13			Colectorul	Termometru electric	105
14	Clasa H		Înfășurările rotorului	Creșterea rezistenței	160
15			Înfășurările statorului		180
16			Colectorul	Termometru electric	105

Tabelul 10.9. **Tensiuni de încercare a înfășurărilor mașinilor**

Nr. crt.	Tipul de mașină	Tensiunea de încercare U_p
1	⩽ 2 kW și ⩽ 40 V	500 V
2	5 kW și ⩽ 100 V	1000 V
3	Toate celelalte cu excepția mașinilor care lucrează independent de tensiunea liniei de contact și sînt conectate la baterie	2 U + 1500 V cel puțin 2500 2 U + 1000 V cel puțin 1500

Tabelul 10.10. Supraturaţii

Nr. crt.	Tipul maşinii		Supraturaţia
1	Motoare de tracţiune	În general	1,25 turaţia maximă admisibilă
2		Un număr de motoare cu acţionarea individuală a osiei cuplată continuu	1,35 turaţia maximă admisibilă
3	Maşini auxiliare cu excitaţie derivaţie		1,2 turaţia de mers în gol
4	Maşini auxiliare cu excitaţie serie		1,5 turaţia nominală
5	Dinamuri pentru iluminat		1,25 turaţia maximă admisibilă

Tabelul 10.11. Încercări de suprasarcină la motoare de tracţiune

Tipul motorului	Durata	Gradul de excitaţie	Tensiunea	Curentul
A. Motoare de curent continuu				
1. Motoare fără reglaj de cîmp	30 s în fiecare direcţie de rotaţie	100%	1,25 U	I
2.			U	2 I
3. Motoare cu reglaj de cîmp		cea mai scăzută valoare	1,25 U	I
4.			U	2 I
5. Motoare cu conexiuni în serie		100%	1,5 U	I pentru n_{max}
6. Motoare fără frînare în pantă	30 s	se reduce excitaţia astfel ca motorul pentru 1,5 din viteza de rotaţie să aibă cîmpul nominal la aceleaşi valori ale tensiunii şi curentului dar viteza $\leqslant n_{max}$	1,3 U_F/z	1,25 I
7. Motoare pentru frînare a locomotivelor			1,5 U_F/z	1,4 I
8. Motoare pentru frînare a automotoarelor			1,5 U_F/z	2,5 I

9. Pentru motoarele de tramvai pentru frînare reostatică cu autoexcitaţie

10. Motoarele de troleibuz pentru frînare reostatică cu excitaţie separată sau autoexcitaţie; trebuie respectate instrucţiunile speciale.

Tabelul 10.11. (continuare)

Tipul motorului	Durata	Gradul de excitaţie	Tensiunea	Curentul
B. Motoare monofazate de curent alternativ				
11. Motoare în general	30 s la motoare pentru ambele sensuri de rotaţie 30° pentru fiecare sens de rotaţie		1,1 U	I
12.			0,75 U	1,7I
13. Motoare care funcţionează continuu conectate în serie			1,33 U	I

U_F — tensiunea nominală a liniei de contact, în V;
z — numărul motoarelor permanent conectate în serie;
n — turaţia motorului, în rot/min;
U — tensiunea nominală a motorului, în V;
I — curentul nominal al motorului, în A.

Tabelul 10.12. Limitele de încălzire ale transformatoarelor şi bobinelor de reactanţă în condiţii de încercare

Nr. crt.	Izolaţie	Tipul de exploatare [1]	Tipul transformatorului sau al bobinei de reactanţă	Metoda de măsurare a temperaturii	Încălzirea-limită °C
1	Clasa A	Regim de durată	Toate bobinele	Variaţia rezistenţei	85
2		Regim uniorar			100
3	Clasa E	Regim de durată şi regim uniorar			115
4	Clasa B				130
5	Clasa F				155
6	Clasa H				180
7	Clasa A_0				80
8	Ulei		Baie de ulei	Termometru cu mercur	70

[1]) În funcţionarea de scurtă durată, funcţionare ce trebuie stabilită în funcţie de timp, sînt valabile încălzirile corespunzătoare regimului unionar.

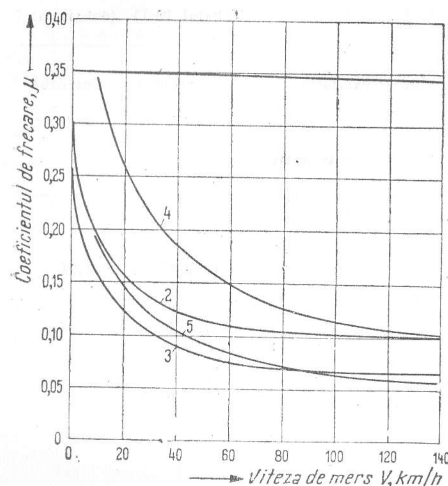


Fig. 10.8. Coeficientul de frecare al frînelor: 1 – frînă disc cu garnituri de frînă sintetice; 2 – frînă cu saboți de frînă din fontă la presiunea de 6 kgf/cm²; 3 – idem la presiunea de 12 kgf/cm²; 4 – frînă electromagnetică cu magneți articulați; 5 – idem cu magneți rigizi

10.3. Substații de tracțiune

Tabelul 10.13. **Necesarul mediu de vehicule**

Tipul de tracțiune electrică	Vehicule pentru 10 km de linie
Tramvai	15–30
Troleibuz	10–20
Cale ferată suburbană	15–30
Cale ferată rapidă urbană, metrou	30–70
Căi ferate magistrale	2 – 4

Tabelul 10.14 **Durata de utilizare anuală a substațiilor și vehiculelor**

Tipul de tracțiune electrică	Durata de utilizare anuală[1], h	
	substații	vehicule
Trenuri urbane rapide, metrou	700–1600	600–1400
Tramvai, troleibuz	600–1400	500–1100
Cale ferată suburbană	1000–2400	700–1400
Cale ferată în curent continuu	1800–4000	700–1400
Cale ferată magistrală în curent alternativ	2600–5200	500–1000

[1]) Cînd se presupune un consum anual de 1–4,5 GWh/km pentru trenuri urbane rapide si metrouri sau 0,3–1,5 GWh/km pentru celelalte tipuri de tracțiune.

Tabelul 10.15. **Randamentul anual între sursa de energie primară și obada vehiculelor motoare**

Sursa de energie	Dispozitivul consumator de energie	Energia transformată între:	Randament anual
Apă	Vehicule electrice	CHE → vehicul electric	40–42
Cărbune	Vehicule electrice	CTE cu contrapresiune → vehicul electric	36–38
Cărbune	Vehicule electrice	CET cu condensație → vehicul electric	13–16
Motorină	Vehicule Diesel	Vehicule Diesel	20–23
Cărbune	Locomotive cu abur	Locomotive cu abur	4– 6

10.4. LINIA DE CONTACT

Efortul la întindere și deschiderea liniei de contact

Liniile de contact sînt construite fie cu suspensie simplă, fie cu suspensie catenară cu cablu purtător și fir de contact. Sistemul fir de contact – cablu purtător poate fi cu sau fără dispozitive de compensare automată.

În cazul construcțiilor cu catenare se folosesc de obicei „fir de contact și cablu purtător compensate" și „fir de contact compensat și cablu purtător fix". Săgeata firului de contact la liniile cu suspensie simplă și a cablului purtător la liniile cu suspensie catenară și cu firul de contact tensionat la același nivel, se obține pentru centrul deschiderii cu formula:

$$f = \frac{\gamma l^2}{8\sigma} \tag{1}$$

în care: σ este efortul la întindere (σ_F – efortul în firul de contact și σ_T – efortul în cablul purtător).

La variația parametrilor liniei aeriene (temperatură, sarcină) efortul la întindere în firul de contact și în cablul purtător rămîne aproximativ constant în cazul „fir de contact și cablu purtător compensate".

Pentru linia cu suspensie simplă, efortul la întindere poate fi calculat din relația:

$$\frac{\gamma^2 l^2}{24\sigma_F^2} - \frac{\gamma_0^2 l^2}{24\sigma_{F_0}^2} = \frac{\sigma_F - \sigma_{F0}}{E} + \alpha(t - t_0) \tag{2}$$

în care:

$$\gamma_0 = \gamma + \gamma_z$$

În cazul unei construcții catenare, cu cablu purtător fix și fir de contact compensat, formula este:

$$(\sigma_{T0} + \sigma_F)^2 \left\{ \sigma_{T0} + E\left[\frac{\gamma^2 l^2}{24\sigma_T} - \frac{\sigma_T}{E} - \alpha(t - t_0)\right]\right\} = \frac{E\gamma^2 l^2}{24}\left(\frac{\sigma_F}{\sigma_T} - \frac{\gamma_0}{\gamma}\right)^2 \tag{3}$$

$$f_z = \frac{(\gamma\sigma_T + \gamma_0\sigma_F)\, l^2}{8\sigma_T(\sigma_{T0} + \sigma_F)} \tag{4}$$

Sarcina normală adițională este:

$$\gamma_z = \frac{0{,}18\sqrt{d}}{A_1} \tag{5}$$

Deviația datorată vîntului, pentru sarcina suplimentară a vîntului $w = cpd$, este:

$$e = \frac{wl^2}{8\sigma_F q_1} \tag{6}$$

Lungimea admisibilă a deschiderii liniei de contact dispuse în zigzag, permisă pentru lățimea efectivă a pantografului și deviației datorată vîntului, este pentru o linie în aliniament:

$$l \leqslant 2\sqrt{\frac{\sigma_F q_1}{w}\left(b + \sqrt{b^2 - z^2}\right)} \qquad (7)$$

La curbe,

pentru

$$R \geqslant \frac{\sigma_F A_1 (b - z)}{2zw} \quad \text{este} \quad l \leqslant 2\sqrt{\frac{R(b+z)}{1 + \frac{Rw}{\sigma_F A_1}}} \qquad (8\ a)$$

pentru

$$R < \frac{\sigma_F A_1 (lb - z)}{2zw} \quad \text{este} \quad l \leqslant 2\sqrt{2Rz} \qquad (8\ b)$$

În aceste relații s-au folosit notațiile:

l — lungimea deschiderii, în cm;
γ — sarcina pe linie, în kgf/cm³;
γ_z — sarcina adițională, în kgf/cm³;
σ_F — efortul la întindere a firului de contact, în kgf/cm²;
σ_F — efortul la întindere maxim admisibil al firului de contact, în kgf/cm²;
σ_T — efortul la întindere a cablului purtător, în kgf/cm²;
σ_{T0} — efortul la întindere maxim admisibil al cablului purtător, în kgf/cm²;
E — modulul de elasticitate al lui Young, în kgf/cm²;
α — coeficientul de dilatare longitudinală, în grd⁻¹;
t — temperatura, în °C;
t_0 — temperatura de referință, în °C ($t_0 = -5$°C);
d — diametrul conductorului, în mm;
A_1 — secțiunea transversală a liniei, în mm²;
f — săgeata, în cm;
e — deviația datorată vîntului, în cm;
w — sarcina datorată vîntului, în kgf/m;
p — presiunea dinamică, în kgf/cm²;
c — coeficientul de presiune dinamică;
b — lățimea efectivă a pantografului, în cm;
z — zigzag-ul firului de contact, în cm;
R — raza arcului, în cm.

Sarcinile suplimentare datorate formării poleiului, chiciurii, zăpezii sau vîntului pot fi determinate în funcție de condițiile locale, dacă se îndepărtează cu mult de la valorile normale. Valorile greutății liniei, diametrelor, modulului de elasticitate, coeficientului de dilatare longitudinală, efortului maxim admis la întindere, care nu trebuie depășit cu sarcini suplimentare pentru temperatura de referință de −5°C, pot fi luate din tabelele 10.16–10,19.

Tabelul 10.16. Firul de contact și cablul purtător

Firul de contact							Cablul purtător					
Fir profilat		Fir cu profil larg[1])		Secțiunea nominală, A_1	Greutatea	Densitatea continuă	Diametrul	Secțiunea		Greutăți medii		
Simbolul	Diametrul, d	Simbolul	Înălțimea					Valoarea nominală	Valoarea calculată	Cupru	Bronz	Oțel
	mm		mm	mm²	kgf/km	A/mm²	mm	mm²	mm²	kgf/km	kgf/km	kgf/km
Ri 65	9,4			65	580	4,5	9,0	50 [2])	49,48	447	447	391
Ri 80	10,6	BRi 80	9,0	80	710	4,25	10,5	70	65,82	597	597	523
Ri 100	12,0	BRi 100	10,5	100	890	4,0	12,5	95	93,27	846	846	741
Ri 120	13,2	BRi 120	12,0	120	1070	3,8	14,0	120	117	1061	1061	930
Ri 150	14,8	BRi 150	14,0	150	1335	3,6	15,7	150	147,1	1337	1337	1171

[1]) Lățime 13 mm.
[2]) Fascicol de 7 conductoare elementare.

Tabelul 10.17. **Caracteristicile conductoarelor de cupru electrolitic STAS 686-65 utilizat la firele de contact la C.F.R.**

Secţiunea mm²	Abatere admisă la secţiune %	Rezistenţă la rupere min kgf/mm²	Alungire min %	Rezistivitatea la 20 °C max $\Omega \frac{mm^2}{m}$	Masa la secţiunea nominală kgf/km
85	± 4	36,3	3,5	$\frac{1}{56}$	712
100	± 4	36	3,5	$\frac{1}{56}$	890

Tabelul 10.18. Şine

Şine conductoare

Secţiunea transversală A_2, mm²	Greutatea G_S kgf/m	Conductivitatea $\varkappa_1$ S m/mm²	Curentul este cules de la:
3509	27,55	7,85–8	deasupra
5100	40,04	7,85–8	dedesubt
5530	43,4	7,85–8	lateral

Şine profilate

Simbolul	Secţiunea transversală A_3 mm²	Greutatea G_S kgf/m	Conductivitatea $\varkappa_2$ S m/mm²
NP 4	7380	57,9	4–5
NP 4 a	7860	61,7	4–5

Şine de rulare, şine Vignoles

Simbolul	Secţiunea transversală A_3 mm²	Greutatea Gs kgf/m	Conductivitatea $\varkappa_2$ S m/mm²
S 14	1784	14	4–5
S 18	2331	18,3	4–5
S 20	2527	19,84	4–5
S 24	3112	24,43	4–5
S 30	3825	30,03	4–5
S 33	4264	33,47	4–5
S 34	4420	34,72	4–5
S 41	5217	40,95	4–5
S 49	6297	49,43	4–5
S 54	6948	54,54	4–5
S 64	8270	64,92	4–5

Tabelul 10.19. **Caracteristicile liniilor şi şinelor**

Linia	Conductivitatea la 20 °C $\varkappa = 1/\rho$ S m/mm²	Rezistivitatea în c.c. la 20 °C ρ Ω mm²/m	Coeficientul de temperatură grd⁻¹	Densitatea kg/dm³
Firul de contact din cupru	56	0,01786	$3,92 \times 10^{-3}$	8,9
Cablul purtător din cupru	56	0,01786	$3,92 \times 10^{-3}$	8,9
Cablul purtător din bronz	36	0,02778	$2,4 \times 10^{-3}$	8,65
Cablul purtător din oţel	7,9	0,127	$2,5 \times 10^{-3}$	7,8
Şina de rulare	5,2	0,192	$5,2 \times 10^{-3}$	7,85
Şina de contact	7,8	0,128	$4,5 \times 10^{-3}$	7,85
Pămîntul	$3,7 \times 10^{-8}$	$27,0 \times 10^{6}$	–	–

Linia	Permeabilitate relativă	Coeficientul de dilatare longitudinală grd⁻¹	Modulul lui Young kgf/cm²	Rezistenţa de încercare kgf/mm²	Efort de întindere maxim admisibil kgf/mm²
Firul de contact din cupru	1	$1,7 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{6}$	40	12
Cablul purtător din cupru	1	$1,7 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{6}$	40	19
Cablul purtător din bronz	1	$1,66 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{6}$	60	30
Cablul purtător din oţel	–	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,96 \times 10^{6}$	70	28
Şina de rulare	300	–	–	–	–
Şina de contact	–	–	–	–	–
Pămîntul	1	–	–	–	–

1 Sm/mm² = 10⁴ S/cm; 1 Ω mm²/km = 10^{-7} Ωcm = 10^{-2}Ω cm²/km

Pentru fir de contact şi cablu purtător cu compensare automată la care variaţiile de temperatură nu au nici un efect asupra efortului de întindere, iar greutatea variabilă a liniei provoacă numai variaţii ale săgeţii, se poate presupune că efortul de întindere nu variază.

Formula deviaţiei datorată vîntului se aplică firului de contact şi cablului purtător cu compensare automată, iar în cazul ultimului şi pentru terminaţiile fixe. Valoarea presiunii dinamice, corespunzătoare unei viteze a vîntului de 26 m/s trebuie folosită la linii cu $p = 42,3$ kgf/m²; coeficientul presiunii dinamice $c = 1,2 \cdot 10^{-3}$ se foloseşte pentru diametre ale conductoarelor pînă la 12,5 mm şi $c = 1,1 \cdot 10^{-3}$ pentru diametre ale conductoarelor de 12,5–15,8 mm (conform paginilor 575–579).

La determinarea lungimii admisibile a deschiderii, se consideră fie valoarea efortului în conductoare şi a sarcinii vîntului pentru firul de contact singur, fie suma valorilor pentru ansamblul fir de contact — cablu purtător depinzînd de valorile care dau efortul cel mai mare deschiderii. Trebuie acordată atenţie creşterii posibile a eforturilor din sistemul de conductoare datorate presiunii vîntului.

În cazul unei dispuneri oblice, în zig-zag a cablului purtător aranjat opus firului de contact, cu suporți orizontali, valoarea zig-zag-ului cablului purtător poate fi folosită la calcule în locul aceleia pentru firul de contact.

Rezistența liniei pentru căi ferate în curent continuu

Rezistența ohmică a firului de contact sau a șinei conductoare pentru o lungime de 1 km este următoarea:

$$R_F = \frac{\rho\, 1000}{A_1} \quad (1\ a)$$

sau

$$R_{ST} = \frac{1000}{\varkappa_1 A_2} \quad (1\ b)$$

Pentru șine de aceeași lungime, se aplică următoarele:
Se calculează valoarea:

$$R_G = \frac{1}{G_s} \quad (2\ a)$$

Fără a se lua în considerare joantele de cale:

$$R_G = \frac{1000}{\varkappa_2\, 2A_4} \quad (2\ b)$$

Cu joantele de cale (valorile tehnice pot fi cerute de la firma producătoare:

$$R_G = \frac{1000}{\varkappa_2\, 2A_3} + \frac{n\, \rho_1 l_1}{2A_4} \quad (2\ c)$$

Rezistența liniei de contact și a circuitului de întoarcere poate fi obținută din ecuațiile (1) și (2). De exemplu, pentru ecuațiile (1 a) și (2 b)

$$R_S = \frac{\rho\, 1000}{A_1} + \frac{1000}{\varkappa_2\, 2A_3} \quad (3\ a)$$

și pentru (1 b) și (2 b)

$$R_S = \frac{1000}{\varkappa_1 A_2} + \frac{1000}{\varkappa_2\, 2A_3} \quad (3\ b)$$

La alte temperaturi decît cea normală de 20°C, trebuie luați în considerare și coeficienții de dilatare longitudinală a diferitelor materiale. De exemplu pentru ecuația (1 a)

$$R_F' = \frac{\rho(1+\alpha\,\theta)\, 1000}{A_1} \quad (4)$$

Rezistența liniei de contact este determinată de rezistența firului de contact și rezistența cablului purtător legate în paralel. Conectoarele longitudinale ale joantelor de cale, măresc rezistența șinei de conductoare cu 0,001 Ω/ km și rezistența căii de rulare

pentru șine nesudate cu aproximativ 20%. În lungimi de secțiuni de 10 km sau mai mult, rezistența conductorului de întoarcere este egală cu dublul valorii rezistenței de propagare

$$R_e = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{R_G}{G}}\,. \quad (5)$$

Factorii G pentru determinarea conductivității transversale a terasamentului căii sînt:
- pentru cale ferată, $G = 2$ S/km;
- pentru linii de tramvai cu traverse de lemn, $G = 4$ S/km;
- pentru linii de tramvai cu fundație de beton, $G = 8$ S/km.

În aceste relații s-au folosit notațiile:

α — coeficientul de dilatare liniară, în grd^{-1};
θ — creșterea de temperatură, în grd;
$\varkappa_1$ — conductivitatea șinei conductoare, în Sm/mm^2;
$\varkappa_2$ — conductivitatea șinei de rulare, în Sm/mm^2;
ρ — rezistivitatea în curent continuu a firului de contact, în Ω mm^2/m;
ρ_1 — rezistivitatea în curent continuu a materialului folosit pentru dispozitivul de contact, în Ω mm^2/m;
G — conductivitatea transversală a terasamentului căii, în S/km;
G_S — greutatea șinelor, în kgf/km;
l_1 — lungimea joantelor de cale, în m;
n — numărul de joante pentru 1 km de cale;
R_e — rezistența de propagare, în Ω/km;
R_G — rezistența căii, în Ω/km;
R_F — rezistența firului de contact sau a cablului purtător, în Ω/km;
R_S — rezistența liniei de contact și circuitului de întoarcere, în Ω/km;
R_{ST} — rezistența șinei conductoare, în Ω/km;
A_1 — secțiunea firului de contact, în mm^2;
A_2 — secțiunea șinei conductoare, în mm^2;
A_3 — secțiunea șinelor căii, în mm^2;
A_4 — secțiunea joantelor de cale, în mm^2.

Impedanța secțiunii pentru căi ferate de curent alternativ

$$\underline{Z}_s = \underline{Z}_f - \underline{k}\omega\, \underline{M}_f\,; \quad \underline{k} = \omega\, \underline{M}_f / \underline{Z}_g$$

Impedanța buclei de întoarcere prin pămînt (bucla de întoarcere prin pămînt a firului de contact, a cablului purtător, sau a șinei conductoare):

$$\underline{Z} = R\frac{\omega\,\mu_0}{8} + j\,\frac{\omega\mu_0}{2\pi}\left(\frac{\mu_r'}{4} + \frac{1}{2} + \ln\frac{2}{\gamma k r}\right)$$

Inductivitatea mutuală între două bucle:

$$\underline{M} = \frac{\mu_0}{8} + j\,\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{2} + \ln\frac{2}{\gamma\, ka}\right)$$

Rezistența efectivă a liniei:

$$R = \frac{Kp}{\sqrt{2U}}$$

Permeabilitatea echivalentă și factorul de dispersare a curentului.

$$\mu_r' = \frac{8\,\pi K \rho}{\sqrt{2}\,\omega \mu_0 U}; \qquad K = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_r}{\rho}}$$

Impedanța rezultantă a buclelor în paralel:

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \omega^2 \underline{M}_{12}^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\omega \underline{M}_{12}}$$

în care:

a este distanța între linii, în cm;
γ — constanta Euler;
K — factorul de dispersie al curentului, în cm^{-1};
$\underline{M}$ — inductanța mutuală între două bucle cu întoarcere prin pămînt, în H/km;
$\underline{M}_f$ — inductanța mutuală între bucla linie aeriană-pămînt și bucla șină-pămînt, în H/km;
M_{12} — inductanța mutuală a ambelor bucle cu întoarcere prin pămînt, în H/km;
μ_0 — constanta magnetică, în H/km;
μ_r — permeabilitatea relativă a materialului liniei;
μ_r' — permeabilitatea echivalentă;
R — rezistența efectivă a liniei, în Ω/km;
r — raza circumferinței liniei, în cm;
ρ — rezistivitatea materialului liniei, în Ω mm^2/m;
U — circumferința secțiunii transversale a liniei de contact, în cm;
ω — frecvența unghiulară a curentului alternativ, în s^{-1};
$\underline{Z}$ — impedanța buclei cu întoarcere prin pămînt, în Ω/km;
$\underline{Z}_1$ — impedanța unei bucle, în Ω/km;
$\underline{Z}_2$ — impedanța celeilalte bucle, în Ω/km;
$\underline{Z}_{12}$ — impedanța rezultantă, în Ω/km
$\underline{Z}_g$ — impedanța buclei șinei, în Ω/km;
$\underline{Z}_f$ — impedanța buclei firului de contact, în Ω/km;
$\underline{Z}_s$ — impedanța secțiunii, în Ω/km.

Constanta Euler, $\gamma = 1{,}781$.

Constanta magnetică $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-4}$ H/km.

Pentru linii de cupru și bronz, permeabilitatea echivalentă $\mu_r' = 1$, iar rezistența efectivă este aproximativ aceeași ca și rezistența în curent continuu. Distanța între bucla de legare la pămînt a liniei de contact și bucla de legare la pămînt a șinei poate fi luată ca distanța dintre firul de contact și muchia superioară a șinei.

Căderea de tensiune maximă pentru o secțiune alimentată în curent continuu sau în curent alternativ, este:

$$\Delta U = c_v I_f R_s l \quad \text{sau} \quad \Delta U = c_v I_f Z_s l.$$

Căderea relativă de tensiune longitudinală pentru căi ferate de curent alternativ;

$$\frac{\Delta U_1}{U_n} = \frac{I_f (R_s \cos\varphi + X_1 \sin\varphi)\, l}{U_n}$$

în care:

ΔU este căderea de tensiune, în V;
ΔU_l — căderea de tensiune longitudinală, în V;
U_n — tensiunea nominală a liniei de contact, în V;
I_f — curentul liniei de contact, în A;
l — lungimea secției, în km;
R_s — rezistența efectivă a secției, în Ω/km;
X_s — reactanța secției, în Ω/km;
φ — defazajul dintre tensiune și curent la sfîrșitul sarcinii;
c_v — factorul de distribuție a căderii de tensiune pe secție.

Tabelul 10.20. **Factorul de distribuție a căderii de tensiune pe secție**

Tipul de alimentare și încărcare	Factorul de distribuție
Alimentare de la un capăt, sarcina într-un singur punct, la capăt	1
Alimentare în centru, sarcină într-un singur punct la un capăt	1/2
Alimentare la un capăt, sarcină distribuită uniform	1/2
Alimentare la centru, sarcină într-un singur punct de ramificație la capăt.......	1/4
Alimentare de la două capete, un singur punct de încărcare în centru	1/4
Alimentare în centru, sarcină distribuită uniform	1/8
Alimentare de la două capete, sarcină distribuită uniform	1/8

Tabelul 10.21. **Factorii determinanți pentru rezistență**

Echipamentul de tracțiune electrică	Tipul curentului și a tensiunii	Rezistența secțiunii [1])	
		Cale simplă [2]) Ω/km	Cale dublă [3]) Ω/km
Tramvai cu fir de contact de cupru de 100 mm și cale de rulare S 41	curent continuu 600 V	0,2	0,1893
Cale ferată suburbană rapidă cu șină conductoare de 40 kgf/m și cale de rulare S 41	curent continuu 750 V	0,0426	0,0338
Cale ferată cu ecartament standard cu fir de contact de 480 mm^2 secțiune transversală echivalentă, de cupru și cale de rulare S 49	curent continuu 1500 V	0,0547	0,0459

Tabelul 10.21. (continuare)

Echipamentul de tracțiune electrică	Tipul curentului și a tensiunii	Rezistența secțiunii [1]) Cale simplă [2]) Ω/km	Cale dublă [3]) Ω/km
Cale ferată cu ecartament standard cu fir de contact 2 × 100 mm² cupru și 120 mm² cablu suport din cupru, cale de rulare S 49	curent continuu 3000 V	0,0646	0,0558
Cale ferată cu ecartament standard cu fir de contact de 100 mm² de cupru, cablu suport de 50 mm² de bronz, și cale de rulare S 49	curent alternativ 16 ²/₃ Hz, 15 kV	0,223 < 46′	0,209 < 43° sau 0,127 < 49°
Cale ferată cu ecartament standard cu fir de contact de 100 mm² de cupru, cablu suport de 50 mm² de bronz și cale de rulare S 49	curent alternativ 50 Hz, 15 kV	0,475 < 66°	0,435 < 65° sau 0,282 < 69°

[1]) La o temperatură medie a liniei aeriene de 20 °C și șine sudate fără joante de cale.
[2]) Circuitul de întoarcere cale simplă.
[3]) Circuitul de întoarcere cale dublă.

11. ÎNCĂLZIREA ELECTRICĂ INDUSTRIALĂ

11.1. CUPTOARE CU ARC ELECTRIC ȘI CUPTOARE DE INDUCȚIE

Tabelul 11.1. Valori de referință ale consumului de energie în cuptoare cu arc electric

Pentru elaborarea de:	kWh/t	Pentru elaborarea de:	kWh/t
Fontă brută	2000... 3000	Ferocrom cu 2–8% C	5000... 7 000
Carbură de calciu	2900... 4000	0,8–1% C	8000... 10 000
Alumină topită	3500... 4500	0,1–0,2%C	14 000... 16 000
Feromangan	3000... 4000	Ferotungsten..............	8000
Ferosiliciu 45..	4500... 5500	Feromolibden	10 000
75%	9000... 11 000	Ciment aluminos	800 ... 1000
90%	14 000... 16 000		

Tabelul 11.2. Cuptoare cu arc electric pentru topirea oțelului și a fontei

Mărimea cuptorului[1]) t	Puterea transformatorului kVA	Puterea reactivă kVA	Diametrul electrozilor de grafit mm	Mărimea cuptorului[1]) t	Puterea transformatorului kVA	Puterea reactivă kVA	Diametrul electrozilor de grafit mm
1	750	250	150	25	10 000	—	450
1,5	1000	300	150	50	18 000	—	550
3	1500	400	200	80	25 000	—	600
6	2500	600	250	100	31 000	—	600
10	4000	800	300	150	45 000	—	600
15	6000	1000	350				

Tensiunile primare .... 6...110 kV
Consumul de electrozi pe tona de oțel .... 6... 8 kg
Consumul de energie pentru topirea deșeurilor de oțel și de fier –.................... 425...525 kWh/t
Consumul de energie pentru purificare și rafinare, funcție de caracteristici (în special de conținutul în C al șarjei și al produsului obținut în final) .... 150...400 kWh/t

[1]) Capacitatea pentru o șarjă compactă.

Tabelul 11.3. **Caracteristicile cuptoarelor de inducţie pentru oţel cu creuzet, cu frecvenţă medie şi cu frecvenţă industrială**

Cuptoare cu frecvenţe medii:

Capacitatea maximă, kg	1–5	10	20	30	50	100	200	300	500
Puterea generatorului, kW	10	18	25	50	75	150	200	250	300
Frecvenţa, kHz	10	10	10 sau 4	10 sau 4	10 sau 4	4 sau 2	2	2 sau 1	2 sau 1

Capacitatea maximă, kg	750	1000	1500	2000	3000	5000	7500	10 000
Puterea generatorului, kW	400	800	1000	1200	1600	2000	3000	4000
Frecvenţa, kHz	1 sau 0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Cuptoare cu frecvenţă industrială:

Capacitatea maximă, t	0,5	1	1,5	2	3	5	7,5	10	15	20	25	20
Puterea la borne, kVA	100	200	300	400	500	600	800	1000	1500	2000	3000	5000

Tabelul 11.4. **Valori de referinţă pentru consumul de energie al cuptoarelor de inducţie cu creuzet, în kWh/t**

Înaltă şi medie frecvenţă:

Oţel topit (cuptoare peste 1000 kg)	500–550	Nichel	650
Cupru	420	Alamă roşie 85% Cu, 5% Sn, 5% Pb	350
Aliaje cupru-nichel	520	Aluminiu	650

Frecvenţă industrială:

Fontă	480–530	Aluminiu	550–600

Tabelul 11.5. **Cuptoare cu inducţie de tip inelar cu frecvenţă industrială**

	Pentru cupru şi aliaje de cupru							
Capacitatea utilă a cuptorului, t	0,25	0,5	0,75	1	3	5	10	15
Puterea la borne, kVA	70	120	200	250	450	650	1200	1800
Productivitatea orară de topire, t	0,2–0,3	0,3–0,5	0,5–0,8	0,8–1	1,5–2	2–3	4–6	6–9

	Pentru aluminiu				Pentru zinc		
Capacitatea utilă a cuptorului, t	1	2	4	10	12	20	100
Puterea la borne, kVA	250	350	400	900	250	400	1000
Productivitatea orară de topire, t	0,4	0,75	1,1	2,3	2	4	10

Factorul de putere 0,7–0,8; tensiunea la borne pînă la 800 V, depinzînd de dimensiuni şi dacă sistemul este mono-bi- sau trifazat.

Tabelul 11.6. **Valori de referinţă pentru consumul de energie, în kWh/t, al cuptoarelor inelare de inducţie cu joasă frecveţă**

Cupru	250–320	Alamă presată Ms 63 (63% Cu, 37% Zn)	200–215
Cupru-Nichel (80% Cu)	350–400	Alamă tare Ms 58 (58% Cu, 40% Zn, 2% Pb)	190–200
Alamă roşie Ms 85 (85% Cu, 15% Zn)	250–270	Aluminiu	400–500
Alamă galbenă Ms 72 (72% Cu, 28% Zn)	210–225	Zinc	95–110

11.2. ÎNCĂLZIREA PRIN INDUCŢIE

Încălzirea prin inducţie este procesul de încălzire prin care în piesa de lucru căldura este produsă prin curenţii electrici ce apar în piesă datorită inducţiei electromagnetice. Acest proces de încălzire se poate aplica numai în cazul materialelor bune conducătoare de electricitate.

Încălzirea prin inducţie oferă posibilitatea ridicării, în timp scurt, a temperaturii în jurul punctului de topire, a suprafeţei sau a întregii secţiuni transversale a pieselor definite ca subţiri. Valoarea curentului indus se reduce cu distanţa de pătrundere x în piesa de lucru conform funcţiei:

$$I_x = I_0 e^{-x/\delta}$$

unde: I_0 este curentul la suprafaţa piesei, δ indică adîncimea specifică de pătrundere, la care curentul scade la valoarea $I_0 e^{-1}$. Adîncimea de pătrundere scade cu creşterea frecvenţei (fig. 11.1). În funcţie de puterea P şi timpul de încălzire t, piesa de lucru poate fi încălzită cu creşterea temperaturii, ΔT dorită:

$$\Delta T = \frac{P \cdot t}{CM},$$

unde: C este căldura specifică a materialului (fig. 11.2);

M — masa materialului ce trebuie încălzit.

Domeniul de aplicare se extinde de la procese de uscare, lipire, călire şi formare la cald pînă la topire şi sinterizare.

Întrucît reactanţa inductivă a inductorului, sub sarcină cu piesa de încălzit, este foarte mare comparativ cu rezistenţa lui efectivă, în cazul instalaţiilor de joasă şi medie frecvenţă, bobinele de inducţie sînt compensate pînă a cos $\varphi \approx 1$ prin condensatoare. Deci transformatoarele, generatoarele de medie frecvenţă, aparatajul de comutaţie şi cablurile de conexiune din circuitul de alimentare se dimensionează numai pentru puterea de lucru. În cazul oscilatoarelor cu tuburi de înaltă frecvenţă, aceste condensatoare fac parte componentă din circuitul oscilant şi deci sînt incluse în generatorul de înaltă frecvenţă.

Încălzirea electrică poate fi aplicată cu avantaje economice numai acolo unde diametrul şi lungimea piesei sînt de 3,5 ori, respectiv 2,5 ori mai mari decît adîncimea de pătrundere specifică.

În procesele de încălzire prin inducţie se utilizează surse de frecvenţă variabilă, în funcţie de dimensiunile materialului piesei şi de programul necesar de încălzire.

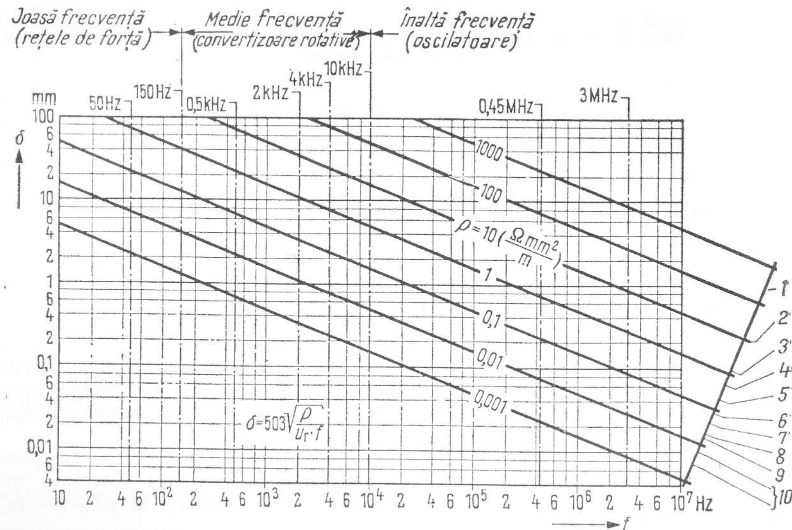


Fig. 11.1. Adîncimea de pătrundere δ a curentului într-un conductor în funcție de frecvență f și de rezistivitatea ρ (aplicabil numai pentru piese avînd diametrul mai mare de 3,5 δ_2): *1* — carbon; *2* — grafit; *3* — oțel la 1 200°C $\mu_r = 1$; *4* — oțel la 650°C $\mu_r = 1$; *5* — oțel la 300°C $\mu_r = 1$; *6* — alamă; *7* — aluminiu; *8* — cupru; *9* — argint; *10* — oțel la 600°C și oțel la 20°C cu $\mu_r = 50$.

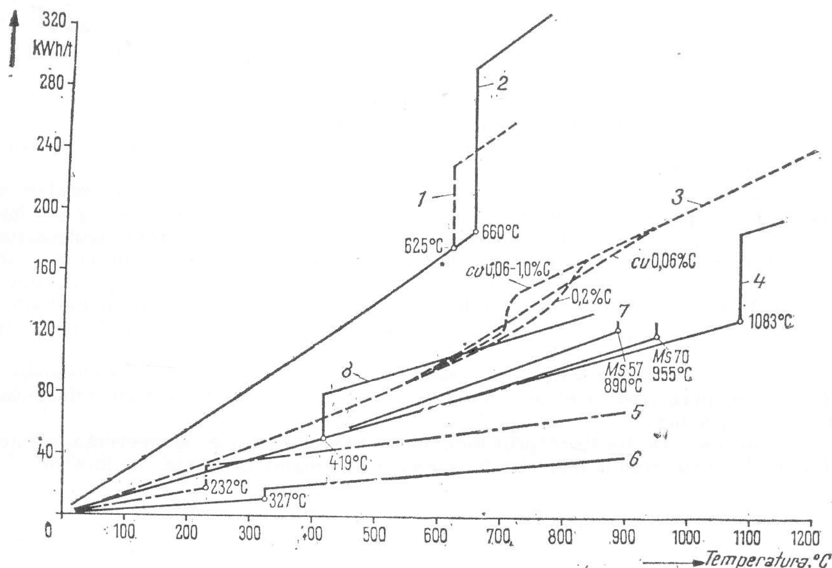


Fig. 11.2. Conținutul de căldură și consumul de metal. *1* — electron; *2* — aluminiu *3* — oțel; *4* — cupru; *5* — staniu; *6* — plumb; *7* — alamă; *8* — zinc.

Instalații cu frecvență industrială

Inductorul este conectat fie direct, fie prin transformator la sursa de putere printr-o conexiune mono sau trifazată. În multe cazuri, bobina de inducție monofazată este compensată simetric cu bobine de impedanță și condensatoare. În cazul unor puteri mici absorbite se poate renunța la transformatoarele intermediare și la condensatoarele de compensare.

Domenii de aplicare; încălzirea metalelor și pieselor mari de oțel și topire prin inducție.

Instalații de medie frecvență

Curentul de medie frecvență este obținut dintr-un convertizor rotativ sau un mutator static de frecvență proiectat pentru o frecvență bine determinată. Partea electrică a schemei include convertizorul mecanic de curent (ce folosește un motor asincron de acționare), aparatajul electric și bateria de condensatoare. Numărul de poli ai generatorului pentru o turație dinainte stabilită determină frecvența generatorului (convertizorului) care pentru frecvența peste 1 kHz lucrează pe principiul cîmpului unidirecțional variabil. În acest scop se utilizează rotoare canelate, pentru a se modifica în timp prin caneluri reluctanța magnetică a întrefierului cu frecvența dorită, modulîndu-se astfel fluxul magnetic stabilizat. Mașinile care lucrează pe acest principiu sînt mașinile homopolare cu bobinaj de excitație inelar, generatoarele Lorenz și GUY.

Condensatoarele sînt proiectate special pentru tensiunea și frecvența impusă. Puterea absorbită este aproximativ de 4...15 ori puterea debitată de generatorul de medie frecvență. Densitatea puterii debitate fiind ridicată, bateria de condensatoare poate fi mică.

Pierderile de căldură care rezultă sînt preluate printr-o răcire suplimentară (prin introducerea de aer din afară sau de lichid de răcire) sau se reduc la minimum prin utilizarea unui material special avînd pierderi mici dielectrice (Styroflex).

Aparatajul electric include aparatele necesare pentru manevră pentru comandă, supraveghere și dacă este necesar, pentru reglarea utilajului. La instalații mici, toate elementele de manevră și condensatoarele sînt montate în celule.

Trebuie avut grijă ca la reamplasarea cablurilor de forță toate legăturile și în special cele de la condensatoare, să fie cît se poate de bine ferite de cîmpuri de inducție.

Dimensiunile timpurilor standardizate de convertizoare de curent continuu sînt:

— convertizoare rotative
10 kHz, 15 — 200 kW;
4 kHz, 25 — 250 kW;
1 kHz, 250 — 2 000 kW;
500 Hz, 400 — 3000 kW.

— mutatoare statice de frecvență:
500 — 2 000 Hz; 400 — 2 000 kW.

Domeniul de aplicare: încălzirea pentru forjare, presare, laminare, normalizare, sudare, călire și topirea prin inducție.

Instalațiile de înaltă frecvență

Aceste instalații produc înaltă frecvență prin oscilatoare cu tuburi autoexcitate, cu un singur etaj. Inductanța circuitului oscilant de înaltă frecvență constă de regulă din înfășurarea primară a transformatorului de ieșire de înaltă frecvență. Tensiunea este dată de redresorul de înaltă tensiune, înglobat. Radiația de energie de înaltă frecvență trebuie menținută la un nivel redus.

Caracteristicile tipurilor standardizate de astfel de generatoare sînt următoarele:
Frecvență: 300 — 500 kHz. Putere: 30 — 150 kW(în cazuri speciale pînă la 700 kW);
Frecvența: 500 — 4 500 kHz. Putere 1 — 30 kW.

Variația cu temperatura a caracteristicilor electrice ale piesei este compensată prin variația frecvenței atît în cazul convertizoarelor statice de medie frecvență cît și în cazul generatoarelor de înaltă frecvență.

Domenii de aplicare: încălzirea parțială, de exemplu pentru călire, sudare, recoacere.

Inductorul pentru încălzire

Acesta este în general adaptat formei suprafeței piesei (de exemplu, inductor inelar, inductor de suprafață, sau inductor tip ac). Conectarea la sursa de alimentare, în cazul călirii, în majoritatea cazurilor se realizează printr-un transformator. Uneori inductorul este echipat cu bobine de scurtcircuitare din fier (din tablă laminată, în cazul frecvenței industriale și medii; din materiale din ferită, în cazul frecvențelor înalte). Inductoarele în formă de bară cu o singură înfășurare pot fi diferite în ceea ce privește lățimea netă, putîndu-se adapta la o gamă largă de piese. Inductorul pentru încălzire este realizat în cele mai multe cazuri din cupru, iar datorită densităților mari de curent se prevede apă de răcire suplimentară prin conducte de apă.

Dispozitive mecanice anexe

Se utilizează dispozitive speciale pentru transportul pieselor de încălzit (incluzînd introducerea, extracția și răcirea piesei). Acestea, împreună cu inductorul pentru încălzire, formează instalația de încălzire prin inducție (cunoscută și sub numele de cuptor cu inducție), mașina de sudat automată sau de călire automată. Instalația poate fi încorporată într-o linie de producție (automată sau neautomată) cu ajutorul unor dispozitive speciale.

Avantajele procesului de încălzire prin inducție

Încălzirea fără contact (fără aplicarea din exterior a unor electrozi), încălzirea directă a pieselor (fără sursă exterioară de căldură), oxidare minimă, calitate uniformă a materialului prelucrat, timp minim necesar pentru pregătirea instalației pentru lucru, reglare rapidă, muncă curată și neînsemnate deranjamente datorite radiației termice.

Încălzirea prin inducție folosită la deformarea la cald, recoacere, topire și sinterizare

Se folosesc în mod obișnuit instalații de frecvență medie și industrială; mai rar de înaltă frecvență. Piesa de prelucrat poate fi menținută pe toată durata tratamentului termic în dispozitivul de încălzire (încălzire statică) sau poate fi deplasată de-a lungul instalației de încălzit (încălzire cu piesă mobilă), ca de exemplu în cazul barelor, țevilor, sîrmelor sau al țaglelor sau blocurilor de oțel (încălzire pe porțiuni).

Întrucît curentul indus încălzește direct suprafața materialului supus tratamentului, timpul de încălzire a oțelului este considerabil mai scăzut decît în cazul unei încălziri indirecte. Printr-o proiectare adecvată a dispoziției bobinelor inductoare, în cea mai mare parte din cazuri este posibil să se obțină o încălzire numai în anumite porțiuni dorite (încălzire parțială). Prin aceasta se obțin eficiență și timp de încălzire convenabile.

Pentru obținerea unor bavuri minime și unor pierderi prin radiație termică scăzute se utilizează instalații de frecvențe cît mai joase. Timpul minim de încălzire este o funcție de dimensiunile piesei, conductibilitatea termică și raportul dintre adîncimea de pătrundere și diametrul piesei de lucru (fig. 11.3).

Bobinele de inducție trebuie să aibă o lungime suficientă pentru a se asigura o încălzire adecvată și satisfăcătoare în profunzime (de la suprafață pînă în miezul piesei). Viteza de transport sau ciclul de operații se adaptează la vitezele de lucru ale benzii de producție sau ale presei de forjare.

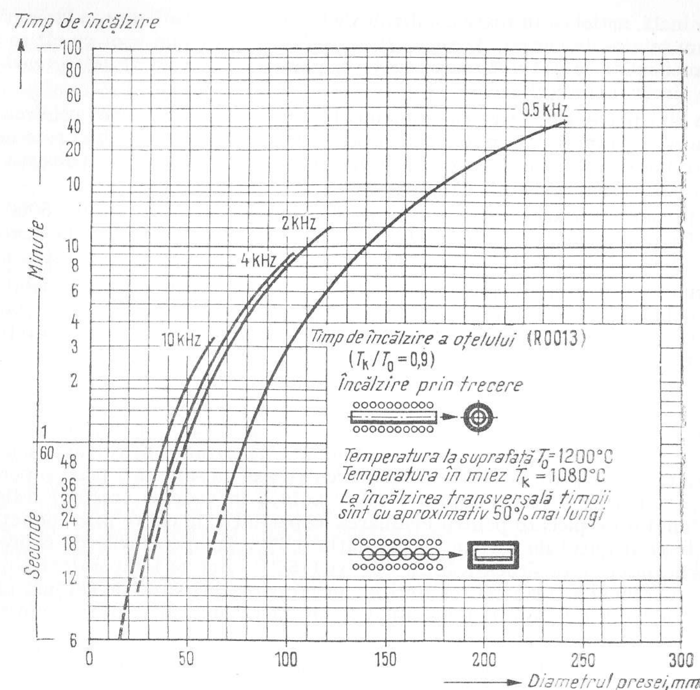


Fig. 11.3. Timpi de încălzire pentru oțel.

Puterea absorbită

Puterea absorbită de la rețeaua de alimentare este în funcție de temperatura de regim, de greutatea materialului care străbate instalația și de proprietățile materialului ce urmează a fi încălzit. Randamentul inductorului variază în acest caz între 40 și 80%, depinzînd de materialul respectiv. De regulă este necesară o putere de inducție de 300—400 kW pentru a încălzi o tonă de oțel. Ținînd seama de randamentul convertizoarelor rotative este necesară în aceste cazuri o putere de circa 400—500 kW.

Repartizarea puterii în instalațiile de încălzire cu inducție (rețele de medie frecvență)

Acolo unde există multe puncte de încălzire cu operații mai mult sau mai puțin simultane, care cer să fie alimentate cu frecvență medie, iar puterea de medie frecvență absorbită variază în limite largi, este întotdeauna justificată realizarea unei instalații de frecvențe medii cu mai multe convertizoare de frecvență rotative și cîțiva consumatori.

În aceste condiții generatoarele care debitează în paralel pe rețea trebuie să poată fi conectate sau deconectate, pentru ca ele să fie întotdeauna încărcate aproximativ la

sarcină nominală, astfel ca în toate condiţiile de lucru să se obţină un randament mai bun şi un consum minim de curent. Acest lucru se obţine cu atît mai uşor cu cît se foloseşte un număr mai mare de convertizoare legate în paralel sau cu cît se micşorează puterea nominală a fiecărui convertizor.

Pe de altă parte, este ştiut că randamentul convertizoarelor mari este mai ridicat, iar costul acestora raportat la puterea debitată este mai scăzut. În final este necesar ca puterea aleasă a convertizorului să se afle într-un raport raţional cu valoarea medie a puterii degajate la punctul de încălzire respectiv.

Pînă în prezent s-au construit sisteme de bare avînd o putere de 5000 pînă la 6000 kW. La puteri mari se utilizează sistemul barelor multiple, care la nevoie pot fi grupate în cîteva subgrupe. Tensiunea barelor se reglează la o valoare constantă.

Pentru anumite scopuri este necesară menţinerea constantă a puterii debitate sau a curentului debitat şi posibilitatea variaţiei continue a frecvenţei. În aceste cazuri este mai utilă folosirea unui sistem de bare secţionate, în care caz se utilizează în reţea schimbătoare statice de frecvenţă.

Călirea prin inducţie

Această operaţie este executată, în general, cu instalaţii de frecvenţe medii sau înalte. În majoritatea cazurilor este încălzit numai un strat subţire superficial pînă la temperatura de călire (călirea contra uzurii). Pentru axe cu solicitări mari şi pentru piese cu destinaţii similare se poate realiza o călire adîncă în vederea creşterii rezistenţei la oboseală. Punctul de plecare pentru evaluarea capacităţii de călire prin inducţie a unui material este conţinutul de carbon de cel puţin 0,3%. Temperaturile de călire în cazul încălzirii prin inducţie se situează între 850 şi 1150°C. Aceste temperaturi pot fi atinse în fracţiuni de secundă. Prin călirea imediat următoare, disiparea de căldură către interiorul piesei de lucru este aşa de mică, încît se obţine o zonă călită precis conturată.

Tabela 11.7. **Adîncimile de călire pentru oţel (valori informative)**

Frecvenţa	Adîncimea de călire	Frecvenţa	Adîncimea de călire
500 Hz 10 kHz	15 mm 2 mm	200 kHz 1 MHz	0,6 mm 0,3 mm

Avantajele călirii prin inducţie

Piesa de lucru rămîne rece în cea mai mare parte, astfel încît solicitările termice create sînt neînsemnate. Piesele pot fi astfel în mod frecvent prelucrate pînă la forma lor finală în stare necălită, fiind călite ulterior. Pot fi făcute astfel economii în privinţa operaţiilor de finisare care sînt costisitoare. Numeroase loturi de piese sînt supuse unui tratament de încălzire identic, astfel că este garantată o calitate uniformă. Este posibilă automatizarea procesului de călire şi includerea maşinilor de călire într-un flux tehnologic. Este suficientă supravegherea printr-un personal mediu calificat.

Utilizări

Călirea prin inducţie este utilizată la călirea diferitelor repere pentru autovehicule, maşini agricole, echipament de construcţie, maşini-unelte, ca şi a axelor, bolţurilor, niturilor, elementelor de transmisie, pinioanelor, cremalierelor etc.

Consumul de putere

În funcţie de frecvenţă se poate transmite suprafeţei, în vederea călirii, o putere între 0,5 şi 8 kW/cm². Puterea necesară este o funcţie de temperatură, de dimensiunile piesei, de regimul de lucru şi de adîncimea stratului călit. Sînt necesare puteri ale generatoarelor de călire de 2 pînă la 500 kW.

Limite de frecvenţă:
- frecvenţa medie de 2 pînă la 10 kHz;
- frecvenţe înalte de 300 kHz pînă la 1,5 MHz.

Lipirea (sudarea) prin inducţie

În acest scop este utilizat echipament de medie şi înaltă frecvenţă. Utilizarea principală este în producţia de masă pentru sudarea metalelor, mai ales la încălzirea parţială a suprafeţelor de sudat. Pentru această operaţie se utilizează aliaje de lipit tari şi moi din comerţ, şi agenţi de decapare sau gaz de protecţie.

Temperaturi de lucru:
- pentru lipituri moi sub 450°C;
- pentru lipituri tari 450 pînă la 1 100°C;

Sînt necesari de asemenea agenţi de topire şi gaze de protecţie, în scopul eliminării straturilor de oxizi la locul de lipire.

Forma şi dimensiunile marginilor de sudat sînt factori importanţi în calitatea sudurii. Puterea necesară este dictată de dimensiunile locului de îmbinat, de temperatura de lucru şi de golul dintre piesele de îmbinat. Pentru piese cu pereţi mici şi subţiri, (zonă mică de încălzire) gama de înaltă frecvenţă este cea mai favorabilă, iar pentru piese avînd pereţi groşi şi cu suprafeţe mari (zonă largă de încălzire) este indicată gama de frecvenţe ridicate şi medii. Puterea necesară este situată între 0,1 şi 2 kW/cm².

Domenii speciale

Uscarea şi topirea pentru metalizări pe metale, normalizarea, recristalizarea, încălzirea, normalizarea cusăturilor de sudură, formarea la cald. Pentru aceste scopuri este preferabil să se folosească frecvenţe medii şi industriale.

11.3. TRATAMENTUL BAZAT PE ÎNCĂLZIREA DIELECTRICULUI

Dacă un material omogen, care este rău conducător de electricitate, este plasat într-un cîmp electric alternativ uniform, atunci, ca rezultat al pierderilor dielectrice şi prin rezistenţa ohmică, se va produce o cantitate de căldură identică pe fiecare unitate de volum al acelui material.

Procedee de încălzire

Pentru majoritatea scopurilor, materialele sînt încălzite uniform în toată masa lor. Totuşi, uneori la piesele neomogene, datorită pierderilor dielectrice diferite, apar variaţii importante de temperatură; de exemplu la îmbinările încleiate de lemn cleiul se încălzeşte mai intens decît porţiunea adiacentă din lemn.

În scopuri de uscare sînt utilizate în general cuptoare intermediare, iar în cazul manipulărilor mecanice simultane, (de exemplu presarea necesară operaţiei de încleiere) sînt mai utilizate procedee statice sau periodice.

Repartizarea căldurii în piesă

Deoarece majoritatea materialelor dielectrice au conductibilitate termică mică, ele nu pot fi uniform încălzite prin aplicarea externă a căldurii. Prin încălzirea dielectrică, căldura este produsă în fiecare particulă a materialului.

Ca rezultat al disipării căldurii în direcția spre exterior, zona de temperaturi maxime se află în general în interiorul pieselor iar temperatura electrozilor rămîne scăzută. În scurt timp pot fi încălzite materiale pînă la temperatura necesară fără ca să fie deteriorate prin temperaturi prea înalte la suprafață.

Dispozitivele de încălzire necesare pentru astfel de procedee constau în principiu din două plăci de condensator, care sînt montate pe piesă. În cazul dispozitivelor de trecere se poate folosi o bandă de transport metalică care constituie totodată și una din plăcile condensatorului.

Oscilatoare electrono-ionice de frecvență

— Putere debitată:	2 ... 100 kW;
— Domeniu de frecvență:	1 ... 30 MHz;
— Benzi de frecvență preferențiale:	13,560 MHz ± 0,05% ; 27,120 MHz ± 0,6% ; 40,68 MHz ± 0,05%.

La aceste frecvențe nu există reguli care guvernează nivelul radiației, însă armonice pot fi emise numai într-o foarte mică măsură.

În scopul de a se acorda circuitul oscilant care conține materialul pentru încălzit, se folosesc condensatoare variabile cu pierderi mici, conectate în serie cu condensatorul de bază.

Puterile debitate necesare sînt funcție de proprietățile materialului (factorul de pierderi și permitivitatea relativă), de temperatura necesară și de puterea transmisă.

Exemple de încălzire în dielectric

Uscarea. În cazul uscării în cameră de uscare statică, există dificultăți pentru uscarea unor materiale cu conductivitate termică scăzută. În acest caz materialele se usucă inițial la suprafață, unde ele suportă efecte de călire și deformații, astfel că este dificil să se elimine umezeala inclusă în profunzimea materialelor. Spre deosebire de aceasta, uscarea bazată pe încălzirea dielectricului elimină umezeala treptat din interior spre exterior, astfel că suprafața materialului rămîne umedă pînă la sfîrșitul procesului de uscare.

Aplicații importante ale uscării în dielectric sînt: uscarea miezurilor turnate în instalații continue și uscarea diferitelor materiale în industria textilă, alimentară, a materialelor plastice. Roțile de măcinat cu liant de rășini fenolice pot fi de asemenea tratate într-un mod similar.

Operațiile de lipire. Încălzirea îmbinărilor lipite ale elementelor de lemn s-a dovedit a fi deosebit de reușită. În acest scop, generatoare avînd puteri debitate între 2 și 12 kW sînt combinate cu piese de încleiat (de exemplu piese de încleiat cu saboți, prese hidraulice pentru scaune și banchete, prese de montaj final, prese de încleiat continuu pentru producția de serie în fabricile de izoplac, echipamente pentru plăci de lemn stratificate și fabrici de parchete).

Sudarea și metalizarea. Instalațiile de înaltă frecvență sînt folosite de asemenea pentru realizarea izolării pieselor componente ale refrigeratoarelor cu izolație din polistiren expandat și pentru acoperirea cu PVC și poliesteri a pardoselilor.

11.4. SUDAREA ELECTRICĂ

Tabelul 11.8. **Procedee de sudare**

Procedee de sudare cu arc electric:		
Sudare manuală Sudare cu arc electric după procedeul Humboldt-Meller Sudare cu arc electric cu electrod învelit culcat Sudare cu arc electric cu electrod cu înveliș cu plasă	Sîrmă sau vergele cu înveliș	
Sudare cu arc electric cu electrod metalic cu miez		
Sudare sub flux Sudare sub flux cu arc electric între doi electrozi-sîrmă Sudare sub flux cu electrod-bandă Sudare electrică în baie de zgură (arcul fiind folosit numai la început)	Sîrmă (bandă) și flux granulat	Arcul arde la capătul unui electrod fuzibil
Încărcare cu arc între două sîrme	În aer	
Sudare cu arc electric în mediu de gaz protector cu electrod fuzibil (în mediu de gaz inert sau în mediu de CO_2) Sudare cu arc electric pulsator Sudare cu arc electric scurt	Mediu de gaz protector	
Sudare cu arc electric în mediu de gaz inert, cu electrod nefuzibil de wolfram Sudare cu jet de plasmă Încărcare prin sudare cu plasmă Sudare cu arc de plasmă Tăiere cu plasmă		Arcul arde la capătul unui electrod nefuzibil de wolfram
Sudare cu arc electric a buloanelor	În aer	

Procedee de sudare prin presiune	Procedee speciale de sudare electrică	Alte procedee de sudare
Sudare prin puncte Sudare prin relief Sudare în linie Sudare în linie cu impuls de curent Sudare electrică cap la cap în stare solidă (sudare prin rezistență) Sudare cap la cap prin topire intermediară	Sudarea țevilor prin curenți de înaltă frecvență Sudare cu ultrasunete Sudare cu fascicul cu electroni Sudare cu fascicul de lumină (laser) Sudare cu arc prin descărcarea condensatoarelor	Sudare oxiacetilenică și tăiere cu oxigen Sudare cu termit prin presiune Sudare prin difuzie Sudare prin presare la rece Sudare prin frecare Sudare prin explozie

11.4.1. Sudarea cu arc electric

Energia de sudare pentru topirea metalului de bază sau a metalului de adaos este produsă prin arcul electric. Cea mai mare parte din energie este eliberată la rădăcina cusăturii (cădere de tensiune anodică sau catodică în caracteristica tensiunii). Dacă coloana arcului se îngustează într-un ajutaj, care înconjoară arcul electric, acesta din urmă se va supraîncălzi extrem de mult, ionizîndu-se intens. În acest caz, arcul electric se numește arc de plasmă.

Caracteristicile sudării cu arc electric

Sudarea cu arc electric necesită surse de alimentare cu energie electrică cu caracteristici speciale, care depind de procedeul respectiv. Pentru sudarea manuală şi pentru sudarea cu electrozi de wolfram, curentul de sudare este menţinut constant printr-o caracteristică exterioară (statică) pronunţat căzătoare a sursei de alimentare (fig. 11.4).

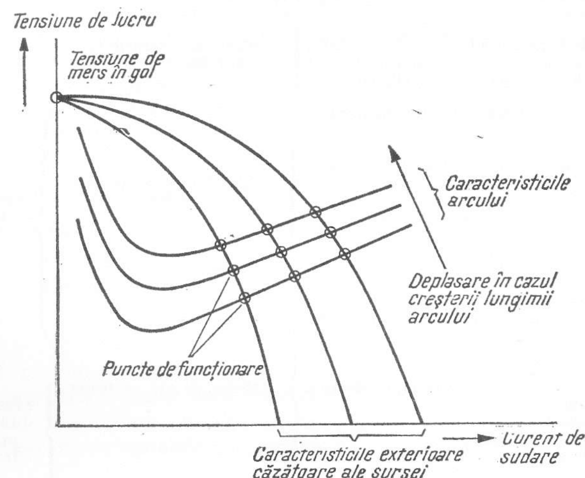


Fig. 11.4. Diagrama sudurii în cazul unei surse de alimentare cu caracteristica exterioară căzătoare.

Observaţie: Procesul de sudare se realizează în punctul de funcţionare. Acesta este intersecţia a două curbe, dintre care una este caracteristica exterioară a sursei de alimentare, iar cealaltă caracteristica arcului electric, care depinde de felul electrozilor, de lungimea arcului, de felul gazului protector etc. Pentru amorsarea corespunzătoare a arcului este necesar să se menţină o tensiune constantă de mers în gol, chiar şi în domeniul de reglare pentru curenţi de sudare mici.

Procedeele care implică topirea sîrmelor, necesită o tensiune constantă pentru reglarea automată a arcului, adică o caracteristică exterioară orizontală. Soluţiile iniţiale constînd în reglarea vitezei de avans a sîrmei în funcţie de tensiunea arcului, devin astfel învechite. Încălzirea sursei de alimentare nu trebuie să afecteze reglarea tensiunii.

La procedeul cu arc electric scurt, la care un electrod subţire de sudare se introduce în baia de metal de 50 ori pe secundă, se recomandă o caracteristică uşor crescătoare. După scurtcircuit, arcul trebuie restabilit printr-o creştere cît mai bruscă posibil a curentului. Comportarea dinamică a sursei de alimentare este în acest caz deosebit de importantă (fig. 11.5).

Caracteristici căzătoare ale sursei de alimentare se realizează prin generatoare cu înfăşurare anticompund, prin generatoare cu cîmp transversal sau prin reglarea cîmpului de scăpări la generatoare cu poli de dispersie (fig. 11.6).

Pentru a se obţine la transformatoarele şi redresoarele de sudare o caracteristică exterioară pronunţat căzătoare, în circuitele acestora se intercalează bobine de şoc premagnetizate (fig. 11.7).

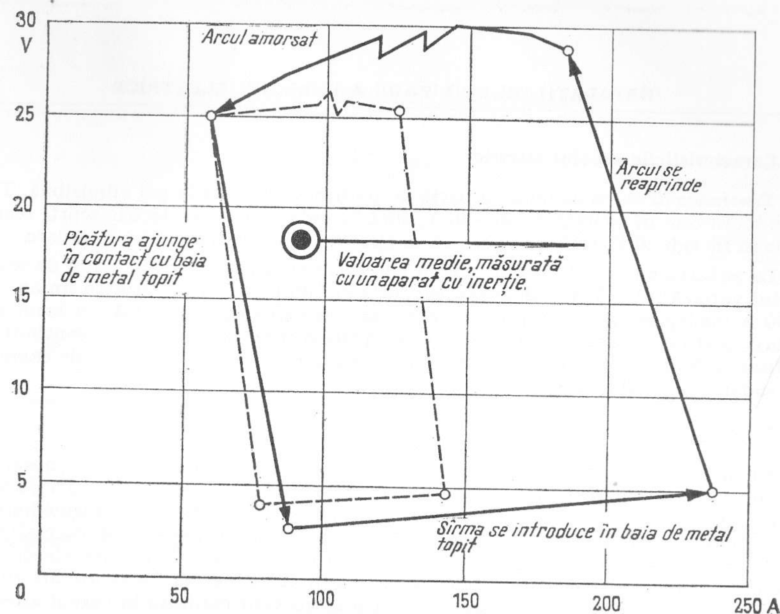


Fig. 11.5. Ciclul procesului de sudare cu arc electric scurt în mediu de CO_2.

Observaţii:
1. Procesul de sudare în cazul unei reactanţe mici în circuit (linie continuă) se efectuează la 160 Hz, durata ciclului fiind de 4,5 ms, durata arcului de 3 ms, timpul de scufundare (imersiune) sau timpul de scurtcircuit de 1,5 ms, iar viteza de creştere a curentului la restabilirea arcului de 70 000 A/s. 2. Procesul de sudare în cazul unei reactanţe mai mari (linie punctată) are o durată a ciclului mai lungă (6 ms), iar viteza de creştere a curentului este mai mică (45 000 A/s).

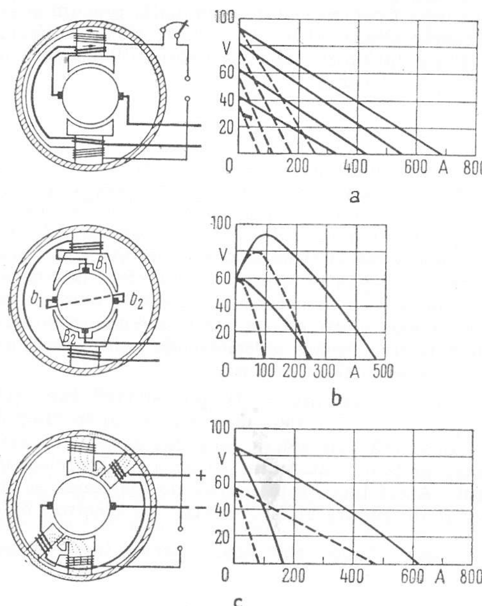


Fig. 11.6. Construcţia şi caracteristicile generatoarelor de sudare: *a* — generator cu compoundare diferenţială; *b* — generator cu cîmp transversal; *c* — generator cu poli de dispersie.

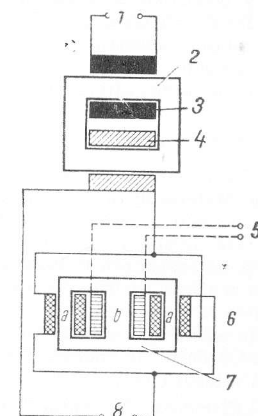


Fig. 11.7. Transformator de sudare, reglat printr-o bobină de şoc, premagnetizată cu curent continuu:
a — bobină de curent alternativ; *b* — bobină de curent continuu;
1 — legătură la reţea; 2 — miezul de fier al transformatorului; 3 — înfăşurarea primară; 4 — înfăşurarea secundară; 5 — bornele curentului continuu de reglare; 6 — bobină de şoc, premagnetizată cu curent continuu; 7 — miezul de fier al bobinei de şoc; 8 — borne pentru curentul de sudare.

Caracteristicile arcului electric

Tensiunea de lucru depinde în parte de tensiunea de mers în gol admisibilă. Tensiunea de lucru este în general de 30—40 V, însă la sudarea cu arc electric scurt, tensiunea trebuie să fie sub 20 V, ţinîndu-se seamă de specificul acestui procedeu de sudare.

La sudarea cu arc electric în mediu de gaz inert, cu electrod nefuzibil de wolfram, curentul variază între 5 A, valoare considerată ca limita inferioară pentru un arc stabil, şi 3000 A (nedepăşind însă în practică decît rareori valoarea de 1500 A) în cazul sudării sub flux cu sîrmă groasă; în cazul sudării cu plasmă însă, arcul poate fi menţinut stabil şi utilizat, coborîndu-se valoarea curentului de sudare chiar pînă la 0,5 A, de exemplu în cazul sudării unor table subţiri.

Felul curentului

În cazul utilizării de electrozi-sîrmă fuzibili, sudarea cu arc electric în curent continuu este cea mai convenabilă; sudarea sub flux poate fi însă realizată la fel de bine în curent continuu cît şi în curent alternativ. În cazul sudării aluminiului în mediu de gaz inert, cu electrozi de wolfram, este necesară o sursă de alimentare cu curent alternativ pentru a se asigura îndepărtarea continuă a stratului de oxid. Componentele de curent continuu în curentul sursei de alimentare trebuie în acest caz să fie suprimate (filtrate) prin condensatoare. Sudarea manuală este tot mai frecvent realizată în curent alternativ, pe de o parte pentru că este o sursă de curent mai economică, iar pe de altă parte, datorită eliminării efectului de suflare a arcului. Transformatoarele de sudare uzuale sînt mai scumpe decît redresoarele, însă au caracteristici dinamice mai favorabile, ceea ce poate prezenta importanţă în cazul sudării cu un efect redus de împroşcare.

La sudarea în curent continuu, alegerea polarităţii prezintă importanţă. Electrozii-sîrmă şi electrozii de wolfram se conectează în general la polul negativ; numai la electrozii cu înveliş de oxid de calciu cu caracter bazic, pentru sudarea manuală, precum şi la sudarea cu arc electric scurt se preferă conectarea la polul pozitiv. Electrozii de wolfram se uzează mult mai repede dacă sînt legaţi la polul pozitiv sau dacă sînt utilizaţi pentru sudarea în curent alternativ, decît în cazul legării lor la polul negativ.

Electrozi pentru sudarea manuală

Electrozii pentru sudare manuală constau din vergele de metal (miez de sîrmă) cu înveliş. Materialul învelişului asigură stabilitatea arcului, şi produce atmosfera de gaz şi zgura, necesare pentru protejarea materialului sudat împotriva accesului aerului. Electrozii fără înveliş nu sînt uşor de utilizat corect, iar îmbinările respective sînt de calitate slabă şi de rezistenţă redusă. Învelişul conţine adeseori şi un adaos de pulbere metalică pentru mărirea rezistenţei mecanice a sudurii sau pentru a produce un efect de aliere. Învelişurile sînt constituite din substanţe minerale cu caracter acid, din rutil acidic, din oxid de calciu cu caracter bazic sau din componente numeroase şi microelemente importante. Curentul de sudare este de 40—50 A pentru fiecare milimetru de sîrmă care formează miezul electrodului, în funcţie de grosimea şi tipul învelişului.

„Electrozii de contact" (electrozi cu înveliş, la care în timpul sudării învelişul se reazemă cu vîrful lui pe piesa de sudat) pot fi deplasaţi de-a lungul rostului în timpul sudării, eliminîndu-se astfel menţinerea constantă, dificilă, a lungimii arcului. Aceşti electrozi pot fi folosiţi de asemenea pentru sudarea automată (sudarea cu arc electric după procedeul Humboldt-Meller fig. 11.8). Acest lucru este posibil de asemenea şi cu alţi electrozi, de exemplu la procedeul de sudare cu arc electric cu electrod culcat (fig. 11.9).

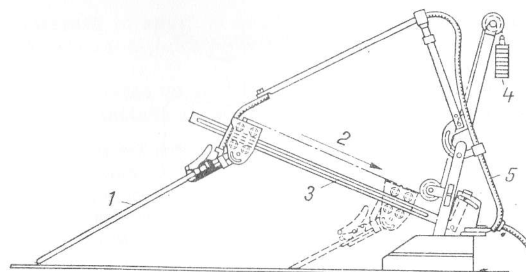
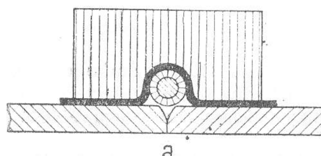


Fig. 11.8. Port-electrod alunecător, folosit în procedeul de sudare cu arc electric Humboldt-Meller (sudarea cu productivitate mare):
1 — electrod; *2* — sens de alunecare; *3* — bară de alunecare; *4* — greutate; *5* — cablu.



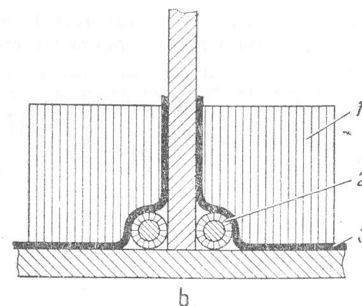


Fig. 11.9. Sudare cu arc electric cu electrod învelit culcat:
a — sudare cap la cap; *b* — pentru sudare în T; *1* — şină de protecţie (din metal neferos); *2* — electrod învelit; *3* — hîrtie.

Sudarea sub flux şi procedee înrudite

La sudarea cu sîrmă de lungime mare, trebuie de asemenea să existe un înveliş protector, acesta putînd fi însă înlocuit şi printr-o altă acţiune protectoare similară. Dacă este necesar, ca învelişul să rămînă aderent pe sîrmă, chiar cînd aceasta este supusă la încovoieri şi răsuciri, sînt necesari electrozi cu înveliş cu plasă. Suprafaţa plasei de sîrmă trebuie să fie astfel dispusă încît curentul de sudare să poată fi uşor transmis de la contactul electric la sîrmă. În comparaţie cu metoda, mai ieftină, de sudare sub flux, sudarea cu electrozi cu înveliş cu plasă prezintă avantajul că arcul electric poate fi observat în timpul operaţiei.

La sudare sub flux, fluxul presărat îndeplineşte şi funcţia de înveliş protector (fig. 11.10). Arcul electric arde în mod invizibil sub stratul de flux. Pentru încărcare prin sudură cu topirea redusă a metalului de bază se aplică sudarea sub flux cu arc electric între doi electrozi-sîrmă, precum şi sudarea sub flux cu electrozi-bandă. La primul procedeu, arcul electric arde între două sîrme conducătoare de curent, direct deasupra

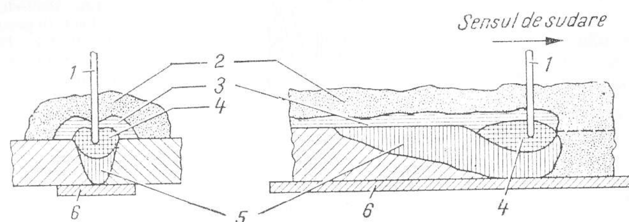


Fig. 11.10. Sudare sub flux:
1 — electrod; 2 — flux; 3 — zgură; 4 — zgură topită; 5 — oţel topit; 6 — bară de cupru.

materialului de bază, care nu este conectat la nici un pol (fig. 11.11). Sudarea sub flux cu electrozi-bandă permite o dispersie largă a energiei arcului peste materialul de bază. Arcul efectuează o mişcare de du-te-vino pe marginea care se topeşte, a benzii, urmînd întotdeauna calea cea mai scurtă.

La sudarea electrică în baie de zgură (fig. 11.12), rostul vertical între două plăci groase, de îmbinat prin sudură, este umplut într-o singură trecere, iar baia de sudură

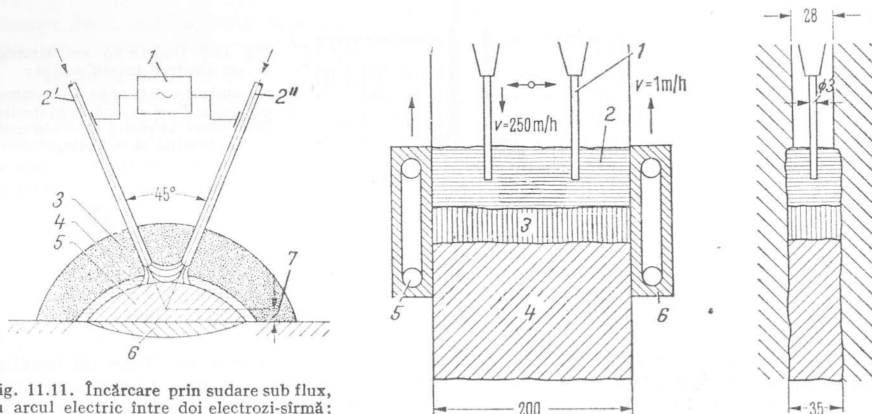


Fig. 11.11. Încărcare prin sudare sub flux, cu arcul electric între doi electrozi-sîrmă; 1 — sursă de alimentare; 2' — electrod-sîrmă 1; 2" — electrod-sîrmă 2; 3 — flux; 4 — zgură; 5 — încărcare prin sudare; 6 — pătrundere (umplere); 7 — distanţa între intersecţia axelor electrozilor şi piesa de încărcare prin sudare.

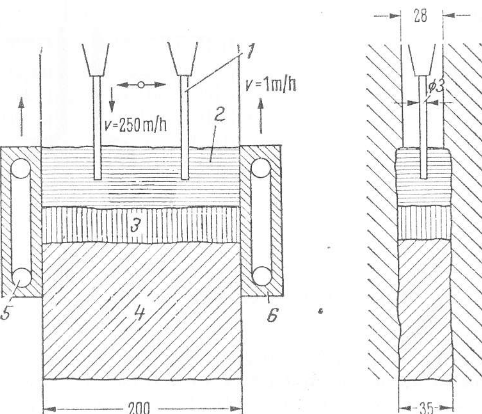


Fig. 11.12. Sudare electrică în baie de zgură:
1 — electrod-sîrmă; 2 — baie de zgură topită; 3 — baie de metal; 4 — cusătură; 5 — răcire cu apă; 6 — sabot-patină glisant de cupru.

este menţinută în rost prin saboţi-patină glisanţi de cupru, răciţi cu apă, care se deplasează în sus, concomitent cu baia de sudură. La plăci foarte groase se lucrează cu doi sau mai mulţi electrozi. După amorsare, se produce un arc electric, care este înlocuit treptat printr-o baie de zgură supraîncălzită. O variantă a acestui procedeu este sudarea în canal, la care electrodul-sîrmă este introdus printr-o ţeavă, care se topeşte încet, fiind

imersată în zgură şi conducînd curentul de sudare. Pe această cale pot fi obţinute cusături cu înălţimea pînă la 1,5 m, fără vreo deplasare a părţilor echipamentului de sudare.

Sudarea cu arc electric în mediu de gaz inert cu electrod fuzibil (M.I.G) şi metode înrudite

Protecţia materialului sudat (cusăturii) faţă de accesul aerului poate fi realizată de asemenea printr-un mediu de gaz protector. În cazul unor materiale sensibile la gaze, ca de exemplu cuprul, aluminiul şi oţelurile aliate, trebuie folosite gaze inerte (argon, heliu), procedeul fiind denumit în consecinţă M.I.G.[1]. Bioxidul de carbon este mai ieftin, însă expune procesul mai mult la împroşcări. Sudări de oţeluri cu împroşcare redusă pot fi obţinute de asemenea cu amestecuri de CO_2, Ar şi O_2. Pentru încărcare prin sudare (sudare cu metal de adaos), cu pătrundere scăzută, capul de sudare folosit la procedeul M.I.G. poate să oscileze pe lăţime pînă la 60 mm; pentru răcirea cusăturii serveşte un al doilea electrod-sîrmă, neracordat la circuitul electric (fig. 11.13).

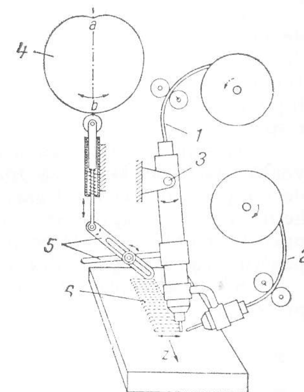


Fig. 11.13. Încărcare prin sudare după procedeul M.I.G., cu oscilaţia transversală a electrodului şi cu electrod-sîrmă suplimentar rece (pentru a produce cusături largi cu o pătrundere minimă în materialul de bază): 1 — electrod-sîrmă; 2 — electrod-sîrmă suplimentar, rece; 3 — axă de oscilaţie orizontală; 4 — disc în formă de cardioidă; 5 — tijă de reglare; 6 — încărcare.

Transferul picăturii prin arc poate fi influenţat, suprapunîndu-se peste curentul continuu un impuls de curent de intensitate mare. Aceste impulsuri se produc prin filtrarea şi modularea unei semialternanţe de curent alternativ sau prin descărcări de condensatoare. Se caută a se obţine o frecvenţă a impulsurilor de circa 50 Hz, precum şi un raport între intervalul dintre impulsuri şi lăţimea impulsului de 7 : 1, raport care se obţine de preferinţă prin descărcări ale unui condensator. Această metodă permite sudarea după procedeul M. I. G., fără împroşcări, a aluminiului, utilizîndu-se transferul normal de material prin picături fine. Acest procedeu prezintă de asemenea avantaje şi în cazul altor materiale.

Sudarea cu arc electric scurt, care a fost descrisă anterior s-a dovedit a fi corespunzătoare pentru table subţiri (cu grosimea sub 3 mm), precum şi pentru stratul de la rădăcină la sudarea ţevilor. Capete speciale de sudare, rezistente la uzură, debitează sîrma de sudare la viteza corectă, corespunzătoare unui proces de sudare fără perturbaţii (fig. 11.14).

[1] M.I.G. — Metal-Inert-Gas

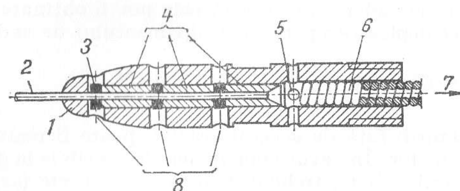


Fig. 11.14. Cap special de sudare, rezistent la uzură pentru sudare după procedeul M.I.G.: *1* — material electric conductor; *2* — sîrmă de sudare (electrod); *3* — material dur; *4* — distanţiere; *5* — orificiu de evacuare a gazului; *6* — sîrmă bobinată; *7* — bornele cablului coaxial de sudare; *8* — orificii de descărcare a rezultatelor uzurii.

Sudare cu arc electric în mediu de gaz inert cu electrod nefuzibil (T.I.G.) [1] şi sudare cu plasmă

Un procedeu convenabil de sudare fără metal de adaos este cel al utilizării electrozilor de wolfram. Acest procedeu implică utilizarea unui gaz inert (dacă este necesar, azot sau hidrogen) ca gaz protector. În cîteva cazuri speciale (sudare rapidă în aer) se pot utiliza de asemenea şi electrozi de grafit.

La utilizarea unui metal de adaos, alimentat în stare rece, procedeul nu este aşa de eficace ca procedeul M.I.G., însă permite sudarea tablelor subţiri (cu grosimea de la 1 mm în sus) rezultînd suduri de încărcare considerabil mai înguste şi mai plate. Încărcarea prin sudare pe suprafeţe mici la fabricaţia în serie poate fi realizată prin topirea unor table (plăci) sinterizate sau a unor elemente fasonate, aplicate pe piesa respectivă.

Trebuie remarcat că arcul electric este amorsat printr-un impuls de înaltă frecvenţă. Astfel se ionizează zona arcului electric, intensitatea lui depinzînd de distanţa de străpungere, de tipul gazului protector, precum şi de tensiunea de mers în gol. În heliu, această străpungere este considerabil mai dificilă decît în argon. În locul unui impuls de înaltă frecvenţă se poate utiliza în cazuri excepţionale un arc electric auxiliar pentru armorsarea arcului electric principal.

Sudarea cu plasmă reprezintă o variantă a sudurii cu arc electric în mediu de gaz protector, cu electrod nefuzibil (T.I.G.), (fig. 11.15).

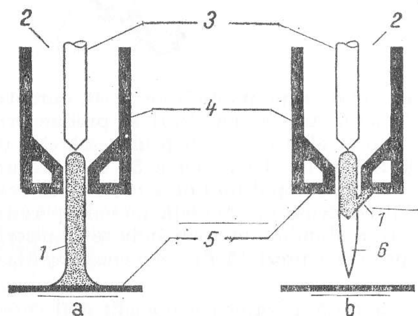


Fig. 11.15. Principiul generării plasmei: *a* — cu arc de plasmă; *b* — cu jet de plasmă; *1* — coloana arcului; *2* — gaz; *3* — catod de wolfram; *4* — duză de cupru, răcită cu apă; *5* — anod; *6* — jet cu plasmă

La sudarea cu jet de plasmă, arcul electric arde între electrodul de wolfram şi un electrod inelar, care înconjură arcul. Arcul este suflat de gazul protector, care este refulat din spaţiul dintre electrodul de wolfram şi cel inelar, precum şi printr-un jet

[1] T.I.G. — Tungsten (wolfram) — Inert — Gas.

îngust de plasmă. Acest jet de plasmă poate fi utilizat, între altele şi pentru îmbinări prin sudare a unor folii foarte subţiri, în care caz jetul de plasmă produce în cusătură (în îmbinarea de sudat) un orificiu care se deplasează şi care se închide singur. Dacă gazului protector i se adaugă o pulbere metalică sau ceramică, procedeul de sudare cu jet de plasmă reprezintă un procedeu care poate fi aplicat la curenţi de sudare de intensitate mare (pînă la 600 A).

Sudarea cu arc de plasmă diferă de procedeul precedent prin adăugarea unui al doilea arc electric, dirijat spre materialul de bază (spre piesa de sudat). Ca rezultat al acestei topiri, precis focalizate, a materialului de bază se obţin suduri compacte de încărcare. Domeniul principal de aplicaţie al acestui procedeu este placarea dură (încărcare prin sudare cu depuneri dure) cu materiale care pot fi adăugate numai în formă de pulbere, deoarece nu pot fi aglomerate într-un electrod de sudare (fig. 11.16).

Îmbinarea prin sudare a tablelor groase este încă în curs de dezvoltare. Căldura excepţional de mare şi focalizarea precisă a jetului de plasmă sînt deosebit de indicate pentru tăierea prin topire a tablelor de aluminiu, cupru sau oţel aliat rezistente la tăierea oxiacetilenică. Astfel pot fi tăiate table cu grosimi pînă la 100 mm. În aceste cazuri, se poate utiliza ca gaz protector azotul. Tensiunile de lucru pot fi mărite adeseori — luîndu-se precauţiile necesare — pînă la 150 V.

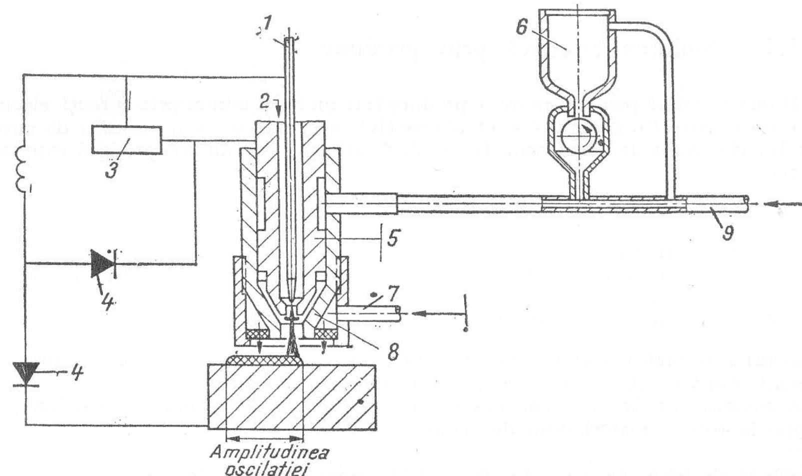


Fig. 11.16. Încărcarea (placarea) prin sudare cu arc de plasmă cu mişcare oscilantă a piesei de încărcat. Schema de principiu a capului de sudare şi a alimentării cu pulbere metalică, precum şi schema electrică: *1* — catod de wolfram; *2* — alimentarea cu gaz pentru vîrf (pentru punctul central); *3* — sursă de înaltă frecvenţă; *4* — redresoare; *5* — duză principală; *6* — recipient de pulbere metalică; *7* — conducte pentru alimentare suplimentară cu gaz protector; *8* — duză de capăt; *9* — conductă de gaz pentru transportul pulberii metalice.

Electrometalizarea şi sudarea cu arc electric a buloanelor

La operaţia de electrometalizare, arcul electric arde între doi electrozi, aşezaţi aproximativ perpendicular unul faţă de altul (fig. 11.17). Metalul topit este proiectat printr-un jet de aer comprimat pe suprafaţa care urmează a fi acoperită.

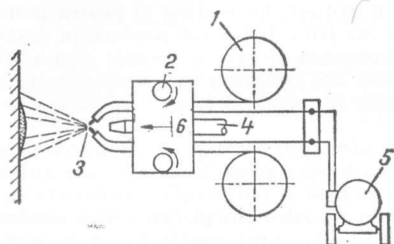


Fig. 11.17. Pistol de metalizare cu arc electric: *1* — tambur cu sîrmă; *2* — rolă pentru alimentarea cu sîrmă; *3* — arc electric; *4* — ţeavă de aer comprimat; *5* — generator de curent continuu; *6* — alimentator.

Sudarea buloanelor se efectuează utilizîndu-se un suport de tip pistol în care se introduce bulonul. Capătul bulonului are un diametru mai redus, formînd un vîrf cu care bolţul se reazemă pe piesa de care trebuie fixat. În momentul declanşării „pistolului", bulonul se îndepărtează pentru scurt timp de pe suprafaţa piesei de lucru, arcul electric se amorsează şi bulonul se sudează instantaneu pe piesă, după ce cele două suprafeţe s-au topit. Arcul electric este produs prin descărcarea unui condensator montat într-un echipament.

11.4.2. Sudarea electrică prin presiune

Căldura necesară pentru sudare se produce într-un timp minim prin curenţi electrici de intensitate mare (în general curent alternativ), operîndu-se cu intensităţi de curent pînă la 100 000 A, la tensiuni pînă la 15 V. Cantitatea de căldură produsă este dată de relaţia:

$$Q = \text{const } I^2Rt \text{ [Ws]}$$

în care:

I este curentul, în A;

R — rezistenţa (rezistenţa materialului de sudat + rezistenţele de contact), în Ω;

t — timpul de sudare, în s.

Calitatea îmbinării sudate este afectată de forţa cu care sînt presate suprafeţele de îmbinat, după ce au ajuns la temperatura de sudare.

La *sudarea cap la cap*, mărimea presiunii specifice de refulare este o funcţie a rezistenţei la roşu a materialului de sudat.

Sudarea electrică cap la cap în stare solidă (sudare prin rezistenţă)

Forma iniţială a sudării cap la cap este sudarea în stare solidă (prin rezistenţă), prin refulare, cu suprafeţele de îmbinat îngrijit prelucrate. Acest procedeu se aplică de preferinţă la sudarea metalelor neferoase şi a pieselor de secţiune mică din oţel.

Sudarea cap la cap prin topire intermediară (tab. 11.9)

Procesul normal de sudare se compune din preîncălzire, topire şi refulare. Procesul de preîncălzire aduce suprafeţele de sudat la temperatura necesară, iar procesul de topire egalizează temperatura pe întreaga secţiune, producînd în acelaşi timp un mediu protector gazos. Procesului de topire îi urmează procesul de refulare realizat cu o viteză de refulare determinată.

Diferitele operaţii mecanice şi electrice sînt complet automatizate, în special la instalaţiile mari de sudat cap la cap. La sudarea cap la cap, cu topire intermediară, a oţelurilor aliate, sudurile sînt răcite încet prin acoperire, sau în funcţie de necesităţi, viteza de răcire se reduce printr-o încălzire ulterioară, modificîndu-se astfel structura din zona influenţată termic.

La piesele de formă inelară şi la cele cu secţiuni transversale complexe (ţevi, profile I, profile pentru construcţii în pînze subţiri etc.,), sînt necesari curenţi de sudare mai mari, datorită scurgerilor de curent şi datorită suprafeţei de răcire mai mari. Sudarea oţelurilor cu procent mare de carbon şi a oţelurilor aliate, datorită conductivităţii termice mai mici, necesită în general un consum de putere mai scăzut; presiunea specifică de refulare, în kgf/mm², din contră, creşte, corespunzător rezistenţei la roşu mai mari.

Tabelu 11.9. **Valori informative pentru sudare cap la cap cu topire intermediară a oţelurilor moi**

Secţiunea transversală mm²	Lungimea liberă de reglare (în fiecare parte) mm	Adaosul de material pentru topire (în fiecare parte) mm	Energia electrică pentru o sudură kWh	Timpul mediu de sudare s
500	15	6	0,10	15
1000	25	7	0,25	25
2000	30	8,5	0,75	35
3000	40	10	1,4	55
4000	45	10,5	2,2	70
5000	50	11,5	3,0	100
6000	60	12	4,0	120
8000	75	13	6,0	210
10 000	80	14	8,5	240
15 000	85	16	15	260
20 000	90	17,5	24	300
30 000	90	20	42	330
40 000	90	22	70	480

Sudarea prin puncte

Tablele care urmează a fi îmbinate se încălzesc la temperatura de sudare între electrozi cu vîrfuri de contact, prin care trece curentul. Presiunea asupra locului de sudat se realizează printr-o pedală sau printr-un dispozitiv pneumatic, hidraulic sau mecanic, care acţionează asupra vîrfurilor electrozilor. Vîrfurile electrozilor trebuie să aibă o rigiditate suficientă, care se poate menţine prin simplă răcire cu apă, sau chiar fără răcire dacă se utilizează pentru electrozi materiale de mare rezistenţă, stabilitate termică şi cu o capacitate de aliere scăzută.

Tipuri de aliaje:

Cu-Cr-Zr, Cu-Cr, Cu-Cd, Cu-Co-Be, W-Cu

Sudarea simplă prin puncte se efectuează cu o maşină, acţionată de o pedală, al cărei transformator de sudare este conectat pe partea primară la sursa de alimentare. Timpul de sudare nu este reglat în mod automat, temperatura de sudare fiind apreciată numai prin observarea culorii de incandescenţă a locului de sudare. Maşinile de sudat, folosite la fabricaţia în masă, sînt echipate însă cu dispozitive de reglare pentru curentul şi timpul de sudare, precum şi pentru forţa exercitată asupra electrozilor. Dispozitivele de reglare lucrează automat, în funcţie de necesităţi, după un program curent-presiune-

timp sau cu un programator de timp (pentru diferite succesiuni de puncte). Liniile tehnologice sînt astfel alcătuite încît combină mai multe mașini de sudat prin puncte cu prese și instalații de transport (vezi și sudarea prin puncte multiple).

Sudarea pieselor voluminoase se realizează mai economic cu clești de sudare prin puncte, pistoale de sudare sau alte dispozitive similare portabile, decît cu mașini staționare de sudat prin puncte. În acest caz, transformatorul este montat pe dispozitivul de sudare sau suspendat separat și conectat la dispozitivul de sudare portabil prin cabluri flexibile, răcite cu apă și avînd o lungime cît mai scurtă posibil. S-au construit și transformatoare speciale, cu putere de vîrf mare și de dimensiuni minime, astfel încît se poate combina de exemplu un aparat de sudat prin puncte de tip pistol cu acest transformator, fără ca prin aceasta mînuirea acestui echipament să devină dificilă.

În tabelul 11.10 sînt date valori informative pentru sudare prin puncte a oțelurilor moi în cazul îmbinărilor cu suprapunere, cu o singură suprafață de forfecare.

Sudarea prin puncte a metalelor neferoase, în special a aliajelor ușoare bune conducătoare de electricitate se efectuează cu curenți de intensitate mare și cu timpi de sudare mai scurți, pentru a se compensa conductivitatea termică mai mare și rezistența electrică mai mică. Datorită cerințelor mari din industria de autovehicule și de avioane privind rezistența mecanică a sudurilor, mașinile de sudat prin puncte pentru aliaje ușoare, trebuie să lucreze cu forțe de apăsare mari pe electrozi și în consecință cu intensități mai mari de curent. Un program forță-curent-timp conform fig. 11.18 are un efect favorabil în ce privește formarea de retasuri și de fisuri la metalele ușoare, aliate cu Si, Cu și Zn, greu de sudat; alt efect favorabil este dispersia mai scăzută a rezistenței.

Reglarea precisă, corespunzătoare perioadelor, a curentului și a forței de apăsare pe electrozi au putut fi realizate, datorită unor dispozitive electronice de control (limitatoare automate, sincrone ale timpului de sudare).

Ținîndu-se seamă de faptul că în sistemul monofazat de 50 Hz, puterea absorbită este mare, este preferabil să se folosească pentru aceste mașini de mare productivitate

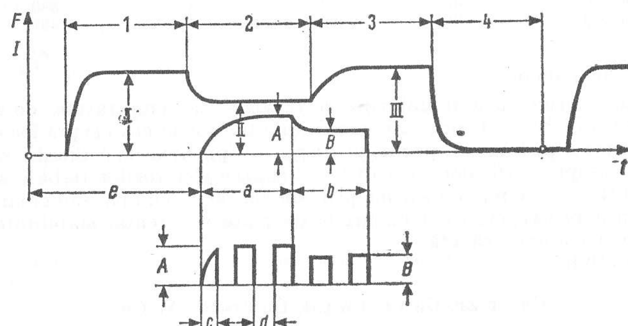


Fig. 11.18. Program forță-curent-timp:
I — curentul (*A* — curentul de sudare; *B* — curentul de postîncălzire); *F* — forța de apăsare pe electrod(*I* — forța de apăsare prealabilă; *II* — forța de apăsare la sudare; *III* — forța de apăsare la forjare); *t* — timpul (*1* — timpul forței de presare prealabilă; *2* — timpul de presare la sudare; *3* — timpul de forjare; *4* — timpul fără presiune); (*a* — timpul de sudare; *b* — timpul de postîncălzire; *c* — timpul de încălzire; *d* — timpul de răcire; *e* — timpul de presare).

Tabelul 11.10. **Valori informative pentru sudare prin puncte**

Grosimea tablei s mm	Diametrul și forma electrodului D mm	d mm	Distanța minimă între puncte e mm	Distanța de la margine a mm	Diametrul nucleului d mm	Curentul de sudare (curentul de post-încălzire) kA	Forța pe electrod, la sudare (la forjare) kgf	Timpul de sudare (de post-încălzire) s
Oțel carbon obișnuit:								
a) Mașini pentru condiții ușoare de lucru:								
2 × 0,5	12	4	10	6		3 — 5	20— 40	1,2—0,36
2 × 1,0	16	6	17	8		4 — 6	40— 80	1,5—0,6
2 × 1,5	16	6	22	9		4,5— 7	60—120	1,8—0,8
2 × 2,0	16	8	28	10		5 — 8	80—160	2,2—0,96
2 × 2,5	16	8	33	11		5,5— 9	100—200	2,6—1,1
2 × 3,0	20	9	38	12		6 —10	120—240	3,0—1,3
b) Mașini pentru condiții grele de lucru — mașini de productivitate mare:								
2 × 0,5	12	4	10	6		6 — 7	80—120	0,16—0,1
2 × 1,0	16	6	17	8		7,2— 9	160—240	0,34—0,16
2 × 1,5	16	6	22	9		8,4—11	240—360	0,48—0,24
2 × 2,0	16	8	28	10		9,6—13	320—480	0,6 —0,34
2 × 2,5	16	8	33	11		10,8—15	400—600	0,72—0,42
2 × 3,0	20	9	38	12		12 —17	480—720	1,0 —0,5
Aluminiu și aliaje de aluminiu [1])								
c) Mașini monofazate:								
2 × 0,5	16	25 plat	10	5	3,2	18	150	4
2 × 1,0	16	76 plat	13	7	4,6	31	270	7
2 × 1,5	16	76 plat	16	10	6,4	35	330	8
2 × 2,0	22	100	19	11	7,6	40	380	8
2 × 2,5	22	152	25	13	9,0	53	460	12
2 × 3,0	22	152	32	14	10,8	69	560	12
d) Mașini trifazate:								
2 × 0,5	16	76 [3])	10	5	3,2	30	250	1
2 × 1,0	16	102 [3])	13	7	4,6	40(11,5)	325(850)	1(3)
2 × 1,5	16	152 [3])	16	10	6,4	52(16,5)	550(1250)	2(4)
2 × 2,0	22	152 [3])	19	11	7,6	62(24)	850(1825)	3(5)
2 × 2,5	22	203 [3])	25	13	9,0	79(32,5)	1225(2650)	3(7)
2 × 3,0	22	203 [3])	32	14	10,8	96(42,5)	1650(3600)	4(8)

[1]) Pentru AlMg 5(56 S), AlZn MgCu (75 S) și AlMg 7 (58 S) curenți pînă la 10% mai mici. Pentru Al(2 S), AlMgMn (4 S) și AlMgSi(51 S) curenți cu pînă la 10% mai mari.
[2]) Electrozii au suprafețe plane de contact cu diametrul *d*.
[3]) Aceste valori se referă la electrozi cu vîrf sferic; prin urmare se va citi „*r*“ în loc de „*d*“.

maşini lucrînd în condiţii grele) un sistem trifazat de alimentare cu montaj de simetrizare, utilizîndu-se 3—6 ignitroane prin care se reduce totodată frecvenţa în circuitul de sudare şi deci şi absorbţia de putere reactivă şi aparentă, îmbunătăţindu-se de asemenea şi factorul de putere.

În tabelul 11.10 sînt cuprinse unele valori informative pentru parametrii principali la sudarea prin puncte a aliajelor de aluminiu.

Sudarea prin puncte multiple

Pentru a se putea efectua simultan un număr mai mare de suduri prin puncte, se folosesc transformatoare de dimensiuni foarte reduse, însă de putere mare, de exemplu transformatoare în manta, cu miez din oţel siliciu cu grăunţi orientaţi. Acestea prezintă avantajul unei bune distribuţii de curent în circuitul primar, precum şi avantajul unei posibilităţi mai bune de adaptare la variaţia condiţiilor în circuitul secundar. În fabricaţia caroseriilor pentru autoturisme se utilizează prese de sudat cu electrozi multipli, cu aceste mici transformatoare de sudare ca unităţi interschimbabile pentru cîte o anumită piesă de prelucrat. Electrozii sînt dispuşi în funcţie de configuraţia spaţială a piesei de sudat. Presele de sudare automată în liniile tehnologice, combinate cu maşini pentru prelucrarea tablei (în majoritate prese) şi cu transportoare automate, permit automatizarea completă a procesului de producţie.

Sudarea prin relief

Sudarea prin relief este aplicată cînd se cere sudarea simultană în mai multe puncte a unor piese ştanţate, ambutisate sau presate. Aplicaţia principală este domeniul fabricării de piese în serie mare, de exemplu în construcţia de autovehicule şi în industria producătoare de accesorii pentru acestea, în construcţia de rezervoare şi aparate, în fabricaţia aparatelor de uz casnic, precum şi în alte ramuri industriale asemănătoare.

Dacă de exemplu urmează a fi îmbinate două table, pe una din ele se presează, concomitent cu procesul de ştanţare sau de presare, şi bosajele corespunzătoare. Scopul bosajelor este de a concentra curentul şi forţa de apăsare a electrodului în punctele de sudare. Dispozitivul de sudare, constînd dintr-un electrod superior şi unul inferior, trebuie să fie adaptat pieselor de sudat; acestea se introduc între placa superioară şi cea inferioară a maşinii, care este asemănătoare unei prese. Forţa de apăsare a electrodului se produce prin dispozitive pneumatice sau hidraulice.

Caracteristicile sudării prin relief sînt următoarele:

a) cu o singură mişcare a electrodului se realizează simultan mai multe sudări prin puncte;

b) schimb de căldură satisfăcător în cazul sudării unor piese, ale căror dimensiuni variază în limite mari;

c) dispersie scăzută a rezistenţei la forfecare a nucleelor în multe domenii de aplicare, în special la piese la care punctele de sudare sînt foarte apropiate;

d) durata de serviciu lungă a electrozilor şi lucrări de întreţinere reduse;

e) aspectul pieselor sudate este în general îmbunătăţit;

f) procesul poate fi automatizat;

g) precizia sudării $\pm$ 0,1 mm;

h) distorsiuni foarte mici, deoarece toate sudurile prin puncte se efectuează simultan.

Sudarea în relief este influenţată de următorii factori:
— compoziţia materialului;
— proprietăţile suprafeţei;
— numărul, mărimea şi aşezarea bosajelor;
— forma şi materialul electrozilor;
— forţa de apăsare a electrozilor;
— curentul de sudare;
— frecvenţa de sudare;
— timpul de sudare;
— mărimea ferestrei [produsul între distanţa dintre plăcile de strîngere şi distanţa dintre centrul plăcii de strîngere şi peretele (partea) din faţă a maşinii].

Calitatea şi durabilitatea sudurii depind de forma bosajelor. Înălţimea bosajelor stă într-un raport specific cu grosimea tablei. Cel mai frecvent se folosesc bosaje rotunde. În fig. 11.19 sînt reprezentate formele mai frecvent folosite ale bosajelor. Tabelul 11.11 cuprinde valori informative, privind datele în legătură cu sudarea prin relief.

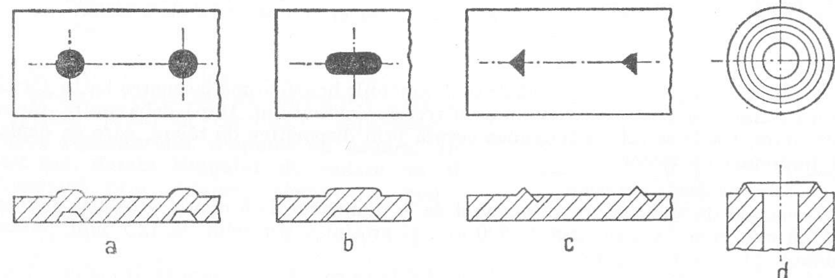


Fig. 11.19. Forme de bosaje:
a — bosaj rotund; *b* — bosaj alungit; *c* — bosaj cu vîrf ascuţit; *d* — bosaj inelar.

Maşinile de sudat prin relief se construiesc pentru curenţi de sudare pînă la 150 kA şi pentru forţe de apăsare a electrozilor pînă la 10 tf. Maşinile sînt construite pentru alimentarea monofazată sau trifazată. Reglarea forţei de apăsare a electrozilor, a curentului şi a timpului se realizează printr-un dispozitiv electronic cu ignitroane.

Tabelul 11.11. Valori informative pentru sudare prin relief de table paralele, $C < 0,15\%$

Grosimea tablei mm	Diametrul bosajului mm	Înălţimea bosajului mm	Pasul bosajelor mm	Curentul de sudare pe bosaj kA	Forţa de apăsare pe electrozi kgf	Timpul de sudare, în perioade la 50 Hz
1,0	3	0,75	22	6	105	6—10
1,5	3,5	0,85	24	7	145	10—15
2,0	4	1,0	25	8,5	190	14—20
2,5	4,5	1,1	27	9	240	16—25
3,0	5	1,25	28	10,5	300	20—30
3,5	5,5	1,4	29	11	360	24—35
4,0	6	1,5	30	12	425	27—40
4,5	6,5	1,6	32	13	500	30—45
5,0	7	1,75	33	14	580	34—50

Sudarea în linie

Sudarea în linie este în principiu un procedeu de sudare continuă prin puncte, folosindu-se electrozi rotativi în formă de role de contact care în general sînt antrenaţi mecanic. La cusături etanşe, punctele de sudură individuale se suprapun, pe cînd la sudare prin serii de puncte se prevăd de obicei intervale mai mari între impulsurile succesive de curent. La sudarea în linie a tablelor din metale uşoare, sudarea fiecărui punct se face în general în timp ce rolele sînt oprite.

Frecvenţa normală a curentului alternativ, de exemplu de 50 Hz poate fi folosită fără întreruperea circuitului numai pentru table subţiri, la viteze de sudare mari. În general însă, procedeul cu impulsuri dă rezultate mai satisfăcătoare. O precizie mai mare a dozării impulsurilor de curent se realizează prin regulatoare electronice, care permit reglarea în limite largi a timpului de sudare şi a pauzei. Astfel se asigură şi reducerea maximă a deformării tablelor.

Regulatorul electronic poate comanda nu numai timpii de sudare şi pauzele, ci şi cuplajul magnetic pentru deplasarea rolelor la sudarea prin puncte cu role, precum şi contactorul electromagnetic pentru acţionarea forţei de apăsare a electrozilor.

Sudarea ţevilor

La fabricarea ţevilor din bandă de oţel, muchiile benzii, după fasonarea lor în formă de ţevi deschise, se sudează continuu prin trecerea curentului. După debavurare, răcire şi îndreptare, ţevile se taie la lungimea cerută prin dispozitive de tăiere, care se deplasează împreună cu ţeava.

Sudarea la joasă frecvenţă

Domeniul de aplicare: ţevi, începînd de la diametrul de 6 mm şi grosimea peretelui de 0,5 mm, pînă la diametrul de 500 mm şi grosimea peretelui de 12,7 mm. Viteza de sudare: pînă la 60 m/min.

Un transformator de sudare cu electrod-rolă se roteşte deasupra ţevii mobile. Pentru a se realiza etanşeitatea cusăturii la viteze mari de sudare, frecvenţa curentului trebuie mărită la 150–400 Hz. Curentul de sudare poate să ajungă pînă la 300 kA.

Sudarea la frecvenţă medie

Sudarea prin inducţie la frecvenţe de 4 – 10 kHz

Sudarea la frecvenţă înaltă (circa 500 kHz)

a) Sudarea prin conducţie, cu alimentarea cu curent printr-un contact alunecător.

b) Sudarea prin inducţie, cu inductor elicoidal.

Domenii de aplicare: ţevi cu diametrul exterior de la 10 la 520 mm.

Viteza de sudare: pînă la circa 80 m/min (v. tab. 11.12).

Ţeava fasonată, deschisă, este trecută printr-un inductor, care înconjoară ţeava în spirală, fără a fi în contact cu ea. În cîmpul inductorului, se induce în ţeavă un curent de înaltă frecvenţă, al cărui circuit este constituit din muchiile ţevii şi punctele lor de contact. Densităţile scăzute de curent în partea din spatele ţevii şi densităţile mari de curent la margini şi la punctele de contact asigură concentraţia de căldură necesară în zona de sudare. Puterea de 60–700 kW, indusă în ţeavă, se produce printr-un oscilator cu tuburi electronice (fig. 11.20).

Tabelul 11.12. Viteze de sudare v a ţevilor în funcţie de grosimea peretelui ţevii s, pentru diferite puteri induse

s, în mm	v, în m/min		
	60 kW	100 kW	250 kW
0,75	80		
1,0	57	> 80	
1,5	40	67	
2,0	31	50	> 80
2,5	24	39	74
3,0	19	32	64
3,5	15	27	55
4,0	13	22	48
4,5	11	18	42
5,0		15	37
5,5		12	33
6,0			28
6,5			25
7,0			22

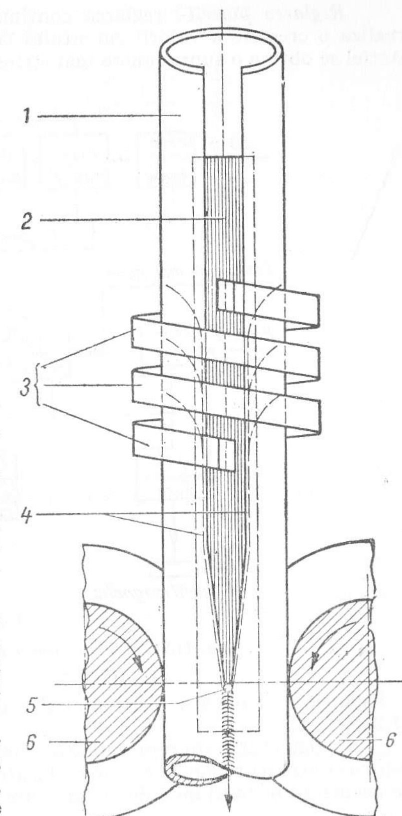


Fig. 11.20. Sudarea ţevilor prin inducţie cu inductor: *1* – ţeavă; *2* – miez magnetic; *3* – inductor; *4* – marginile deschise ale ţevii; *5* – punct de sudare; *6* – role de strîngere.

Reglarea maşinilor de sudat prin presiune

Una din condiţiile pentru reglarea timpului la maşinile de sudat prin puncte, prin relief şi în linie este condiţia ca suprafaţa tablelor să fie curată. Pentru table acoperite cu straturi de oxizi, există relee de limitare a timpului de sudare, lucrînd în funcţie de curent, de putere sau de tensiune; ele nu satisfac însă în întregime cerinţele puse.

În timpul sudării prin puncte a tablelor de oţel plane, variaţia reglării maşinii se poate realiza între anumite limite, în funcţie de variaţia tensiunii reţelei sau de toleranţele pieselor de sudat, printr-un dispozitiv suplimentar, aplicat regulatorului timpului de sudare. În acest caz, durata timpului de sudare va fi influenţată prin rezistenţa electrică a punctului de sudură.

În cazurile de putere de sudare relativ redusă, de frecvenţă mică a punctelor de sudură şi de materiale uşor sudabile, este suficient un singur contactor cu un limitator (regulator al timpului de sudare).

La frecvenţe de conectare mai mari, precum şi la puteri electrice mai mari, pentru a se obţine o dozare exactă a energiei de sudare, partea primară a transformatorului de sudare trebuie să fie reglată printr-un regulator al timpului de sudare, în montaj asincron sau în montaj sincron.

Aceste aparate sînt construite din subansambluri asamblabile.

Tipuri de bază pentru aparate de reglat:

– Reglarea în ciclu simplu cu şi fără acţionarea unui ventil magnetic (fără repetare).
– Reglarea în ciclu simplu cu acţionarea unui ventil magnetic (cu repetare).
– Reglarea în ciclu complex cu acţionarea unui ventil magnetic (fără repetare).
– Reglarea în ciclu complex cu acţionarea unui ventil magnetic (cu repetare).
– Reglarea treptelor de curent, cu acţionarea unui ventil magnetic.
– Reglarea cusăturii cu acţionarea unui ventil magnetic
– Program conform fig. 11.21.

Reglarea puterii : reglarea continuă a intensităţii curentului. La cerere se poate realiza o creştere a valorii curentului la începerea intervalului în care circulă curentul. Astfel se obţine o suprapunere mai strînsă a pieselor de sudat, o împroşcare mai redusă,

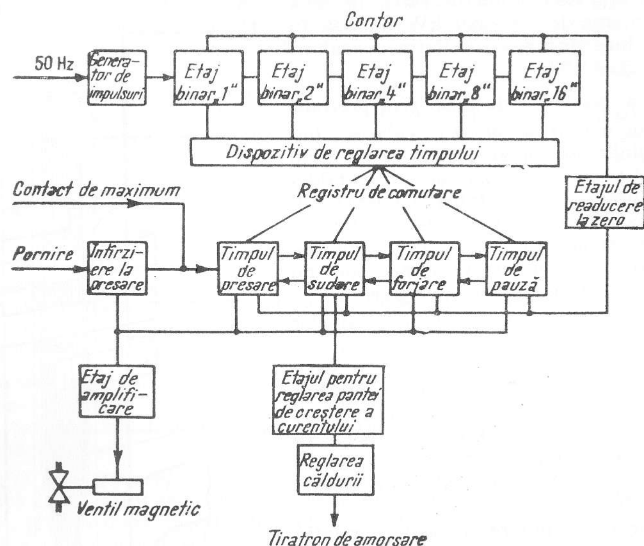


Fig. 11.21. Schema bloc a unui regulator electronic cu ignitron.

o dispersie mai mică a rezistenţei şi o durată de serviciu mai mare a electrozilor (fig. 11.22).

În fig. 11.23 este reprezentată schema de principiu a unui convertor de frecvenţă pentru conectarea unei sarcini monofazate la o reţea trifazată. În figură este reprezentată de asemenea şi tensiunea de sudare care derivă din cele trei faze ale reţelei.

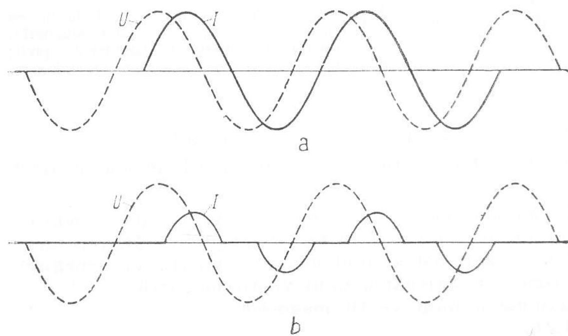


Fig. 11.22. Regulator de timp cu ignitron pentru reglarea puterii. Caracteristicile curentului. Timpul de sudare este de două perioade; cos φ = 0,5: *a* — modulaţie 0°; *b* — modulaţie 45°.

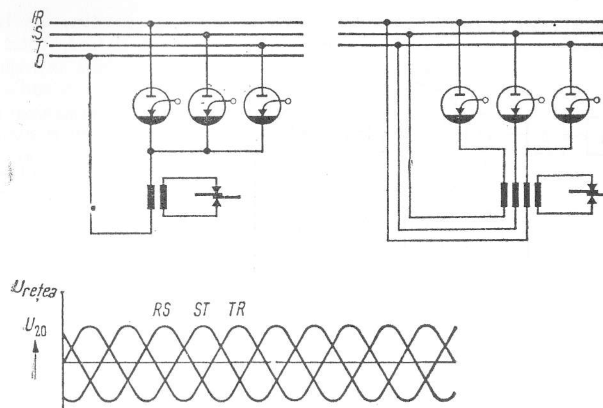


Fig. 11.23. Conectarea trifazată a unei maşini de sudat prin presiune.

Dacă un impuls de curent continuu, a cărui durată maximă este influenţată de secţiunea transversală a miezului transformatorului de sudare, nu este suficient, se combină mai multe semialternanţe (fig. 11.24).

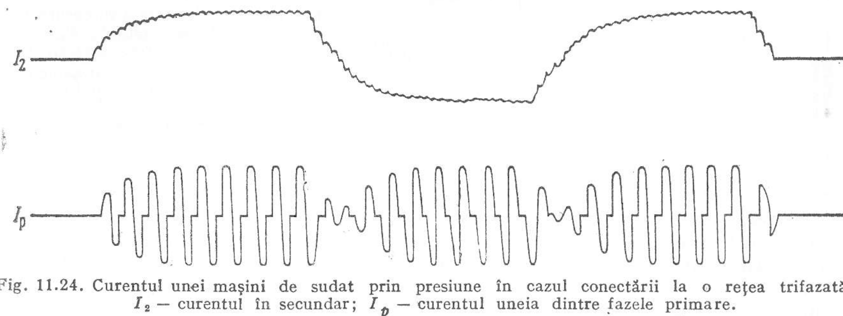


Fig. 11.24. Curentul unei maşini de sudat prin presiune în cazul conectării la o reţea trifazată: I_2 — curentul în secundar; I_p — curentul uneia dintre fazele primare.

Aparate de măsurat

Aparatele de măsurat se folosesc pentru controlul şi urmărirea curentului de sudare, a timpului de sudare şi a forţei de apăsare a electrozilor. În afară de aceasta, în practica curentă se mai măsoară şi rezistenţa de contact a pieselor sudate.

Ampermetrul de impuls

Ampermetrul de impuls (fig. 11.25), care măsoară curentul în circuitul secundar, este prevăzut cu un integrator dublu şi o unitate de memorare. Gama ampermetrului acoperă curenţi de formă predominant nesinusoidală, care circulă în interval de numai cîteva perioade.

Contorul de perioade

Contorul de perioade (fig. 11.26) este un aparat complet electronic, utilizat pentru controlul timpului prestabilit al regulatoarelor electronice. Contorul se conectează la circuitul secundar al maşinii de sudat prin presiune.

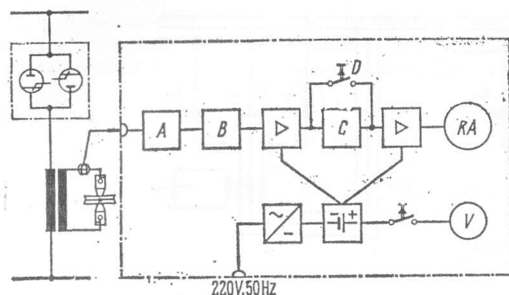


Fig. 11.25. Schema-bloc a unui ampermetru de impuls (tip cu baterie): A — primul integrator; B — al doilea integrator; C — blocul cu memoria măsurării; D—buton de readucere la zero.

Aparatul indicator de măsurat forţa de apăsare a electrozilor

O metodă simplă de măsurare a forţei electrozilor constă în intercalarea unui aparat, de exemplu, între vîrfurile electrozilor unei maşini de sudat prin puncte. Îndoirea unui inel de oţel produce deviaţia indicatorului aparatului, forţa citindu-se direct pe un cadran etalonat în kilograme-forţă.

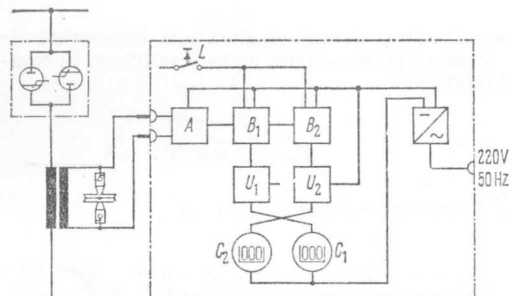


Fig. 11.26. Schema-bloc a unui contor de perioade: A — blocul de formare a supracurentului; B_1 — contor binar „unităţi"; B_2 — contor binar „zeci"; U_1 — transpunere, decada binară „unităţi"; U_2 — transpunere, decada binară „zeci"; C_1 — indicator „unităţi"; C_2 — indicator „zeci"; L — buton de readucere la zero.

Aparatul înregistrator de măsurat forţa de apăsare a electrozilor

În mod frecvent se cere măsurarea forţei de apăsare a electrozilor în timpul sudării, cînd nu poate fi utilizat inelul mai sus menţionat. În aceste cazuri, se poate folosi aparatul înregistrator OSCILLOMINK, care înregistrează prin cerneală, fiind înzestrat cu un convertor şi un transmiţător (fig. 11.27).

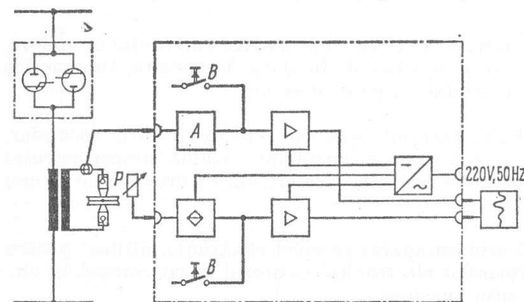


Fig. 11.27. Schemă-bloc a convertorului: A — integrator; B — întreruptor de verificare; P — dinamometru.

Dispozitivele utilizate ca transmiţătoare de măsură sînt: pentru curent — bobină toroidală fără miez; pentru presiune—indicatoare de presiune; pentru forţa de apăsare — aparate de măsurat forţa (dinamometre). Semnalele de măsură sînt prelucrate într-un convertor şi alimentează un aparat înregistrator pentru înregistrarea a două mărimi. Convertorul integrează semnalul de la bobina toroidală, respectiv transmite, pentru circuitul punţii, tensiunea de măsură de la indicatorul de presiune sau de la dinamometru. Utilizîndu-se un înregistrator de tip OSCILLOMINK, se obţine o înregistrare continuă şi vizibilă a presiunii, a forţei şi a curentului (fig. 11.28), pentru fiecare ciclu de operaţii asigurîndu-se astfel realizarea unor sudări prin puncte de înaltă calitate, de exemplu în industria de automobile şi de avioane.

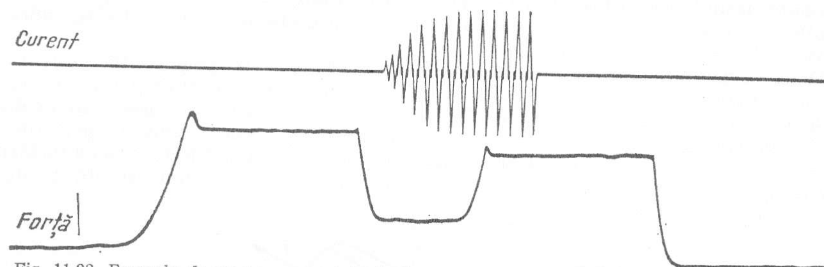


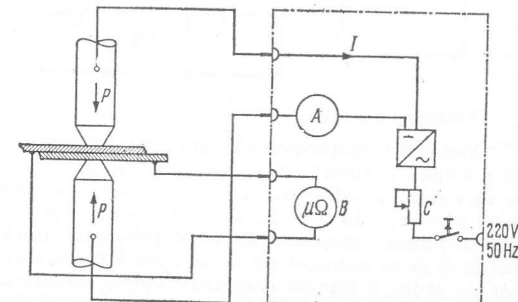
Fig. 11.28. Exemplu de program curent-forţă, înregistrat cu un aparat de tip OSCILLOMINK, pentru înregistrarea a două mărimi cu convertor, bobină toroidală şi indicator de presiune.

La maşinile de sudat prin presiune, cu alimentare trifazată, măsurarea curentului se efectuează cu un alt aparat, echipat cu un generator Hall. În acest caz, integrarea în convertor nu este necesară.

Aparatul de măsurat rezistenţa de contact

Aparatul de măsurat rezistenţa de contact (fig. 11.29) a fost dezvoltat pentru controlul stării de pregătire a suprafeţelor pieselor de sudat şi constă dintr-o presă de încercare şi un element indicator. Epruvetele sub formă de bandă sînt prinse între doi electrozi şi apăsate cu o presiune de încercare predeterminată. Căderea de tensiune constituie o măsură a rezistenţei de contact, deoarece curentul de măsurare este reglat la 20 A. Milivoltmetrul este etalonat direct în microohmi. Controlul rezistenţei de contact este necesar cînd se lucrează, în special în industria aeronautică şi de automobile, cu aliaje uşoare, după decapare şi înainte de sudarea lor prin puncte.

Fig. 11.29. Schema-bloc a aparatului de măsurat rezistenţa de contact: B — voltmetru, etalonat în $\mu\Omega$; C — reglarea curentului de încercare; I — curentul de încercare; P — forţa de apăsare a electrozilor.



11.4.3. Procedee speciale de sudare electrică

În afară de procedeele de sudare cu arc electric şi prin presiune, în ultimii zece ani s-au mai dezvoltat alte procedee electrice de sudare, care diferă între ele prin aparatajul electric necesar şi prin efectele obţinute.

Sudarea ţevilor prin curenţi de înaltă frecvenţă

Ţevile sînt fasonate din benzi de tablă, iar rostul longitudinal se sudează prin încălzire prin curenţi de înaltă frecvenţă. După ce banda de tablă a trecut prin rolele de fasonare, ieşind sub formă de ţeavă, curentul de înaltă frecvenţă este concentrat în marginile benzii de tablă, care formează un clin; marginile astfel încălzite se sudează în momentul cînd vin în contact una cu alta.

Dacă alimentarea cu curent de înaltă frecvenţă se face prin contact direct cu marginile benzii de tablă, procedeul este denumit sudare prin curenţi de înaltă frecvenţă cu încălzire prin conducţie (fig. 11.30). Dacă curentul de încălzire este indus liniar deasupra interstiţiului dintre marginile benzii prin intermediul unei bobine suspendate de înaltă frecvenţă, procedeul se numeşte sudare prin curenţi de înaltă frecvenţă cu încălzire prin inducţie (fig. 11.31). Pentru ţevi cu grosimea peretelui de 6 mm, se obţin viteze de sudare pînă la 60 m/min.

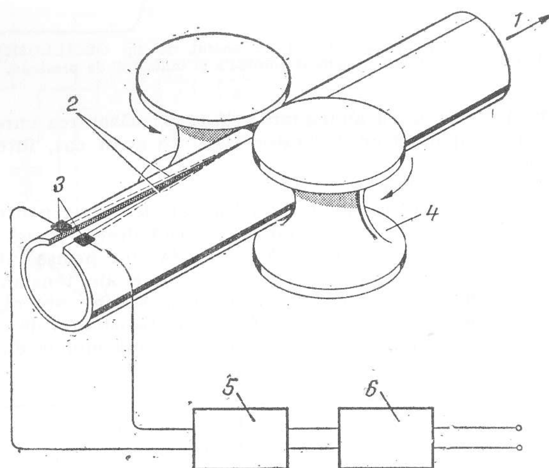


Fig. 11.30. Sudarea ţevilor prin circuite de înaltă frecvenţă cu încălzire prin conducţie:
1 — sensul de deplasare a ţevii; 2 — curentul de sudare; 3 — contacte alunecătoare (fixate); 4 — role de strîngere; 5 — transformator de înaltă frecvenţă; 6 — generator.

Sudarea cu ultrasunete

Metalele şi materialele plastice pot fi îmbinate prin sudare cu ultrasunete, frecîndu-se sau presîndu-se piesele de sudat una contra alteia, astfel încît ele să vibreze mecanic. Un oscilator cu tuburi electronice sau un generator tranzistorizat produc un curent de înaltă frecvenţă de circa 22 kHz, la o putere de 6 kW. Energia electrică este transformată în vibraţii mecanice, fie după principiul magnetostricţiunii, fie prin efectul piezoelectric (a doua variantă producînd pierderi mai scăzute). Vibraţiile se transmit materialelor de sudat printr-un dispozitiv numit sonotrod. Capul emiţătorului de ultrasunete este adus în poziţia potrivită, deasupra locului de sudare.

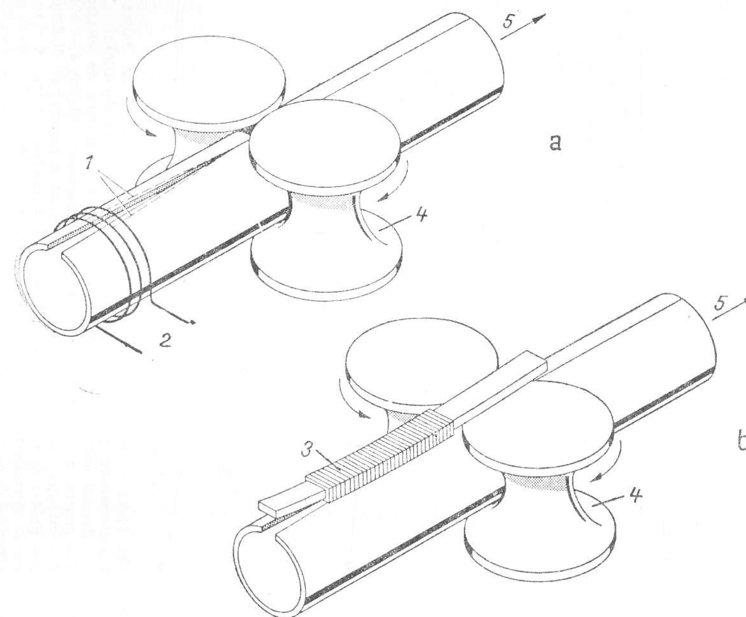


Fig. 11.31. Sudarea prin curenţi de înaltă frecvenţă cu încălzire prin inducţie:
a — cu inductor elicoidal; *b* — cu inductor liniar;
1 — curent de sudare; 2 — inductor elicoidal; 3 — inductor liniar; 4 — role de strîngere; 5 — sensul de deplasare a ţevii.

Pentru sudarea metalelor, vibraţiile ultrasonore sînt incidente paralel cu suprafeţele de sudat (fig. 11.32), astfel încît se produce o sudare prin microfrecare. Cele mai potrivite pentru acest procedeu de sudare sînt metalele cu tendinţa de eroziune şi de mînjire, de exemplu aluminiul.

Pentru sudarea materialelor plastice, vibraţiile ultrasonore sînt incidente perpendicular pe suprafeţele de sudat (fig. 11.33). Energia de reflexie absorbită provoacă topirea zonei de suprafaţă şi sudarea ei. Pentru acest procedeu sînt potrivite numai materialele termoplastice.

În cazul metalelor, se poate proceda şi la sudarea în linie. În acest caz, sonotrozii, ale căror capete sînt înzestrate cu discuri, se rotesc împreună cu generatorul de vibraţi.

Sudarea cu fascicul de electroni

Maşina de sudat cu fascicul de electroni (fig. 11.34) funcţionează după principiul unui tub de raze X, cu deosebirea să se utilizeze energia de şoc (energia incidentă) a unui fascicul de electroni. Fasciculul este produs cu o tensiune de 30—200 kV. Sudarea se efectuează prin producerea unui orificiu în material, cu ajutorul unui fascicul precis

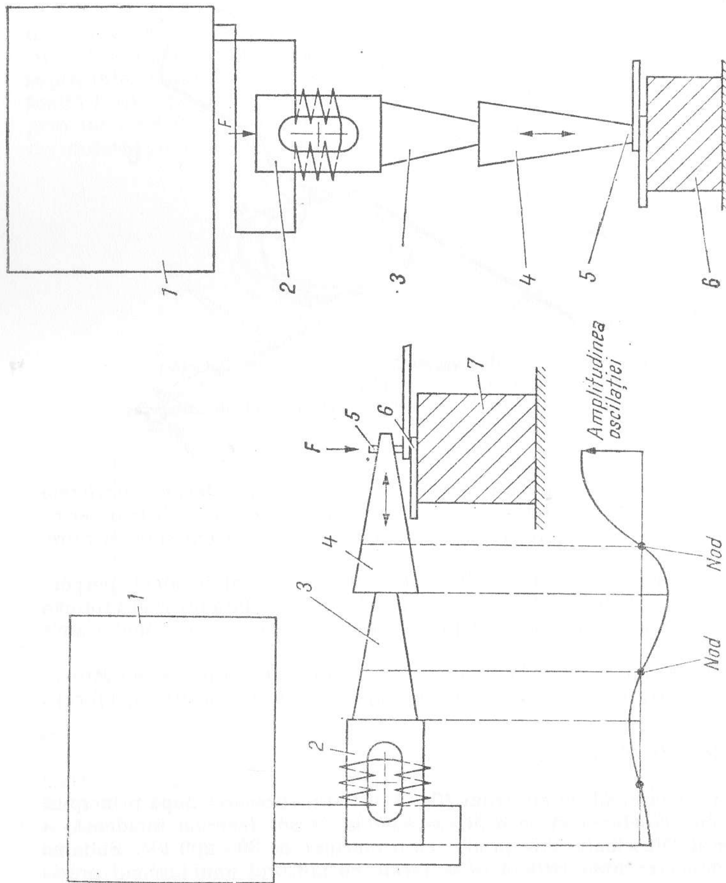


Fig. 11.32. Sudare cu ultrasunete a metalelor (suprafețele fiind frecate una de alta):

1 — generator de înaltă frecvență; *2* — vibrator magnetostrictor; *3* — ghidaj de vibrații; *4* — traductor ultrasonor; *5* — sonotrod; *6* — piese de sudat; *7* — reazem fix.

„Nod" este punctul de zero al vibrației. Caracteristica vibrațiilor arată distribuția valorilor maxime, iar săgețile duble indică mărimea și direcția vectorilor de vibrații în sisteml de rezonanță.

Fig. 11.33. Sudarea cu ultrasunete a materialelor plastice (suprafețele vibrează una deasupra alteia):

1 — generator de înaltă frecvență; *2* — vibrator magnetostrictor; *3* — ghidaj de vibrații; *4* — traductor de ultrasunete; *5* — capul emițătorului de ultrasunete este fasonat (adaptat la piesa de sudat); *6* — reazem fix.

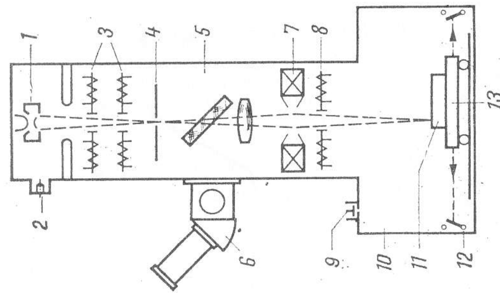


Fig. 11.34. Mașina de sudat cu fascicul de electroni:

1 — sursa fasciculului de electroni; *2* — măsurarea vidului; *3* — bobine magnetice de reglare; *4* — diafragmă; *5* — camera fasciculului; *6* — obiectivul observatorului; *7* — lentile magnetice; *8* — bobine de focalizare; *9* — supapă de admisie a aerului; *10* — cameră de vid; *11* — piese de sudat; *12* — întreruptor de sfîrșit de cursă; *13* — suport pentru piesele de sudat.

focalizat. Acest orificiu se închide continuu, deplasîndu-se deci de-a lungul cusăturii. Ca rezultat se produc cusături cu lățimi de numai 0,5 — 1,5 mm, chiar și în cazul unui material cu o grosime de 50 mm și mai mare. Sudurile mai prezintă avantajul că practic nu suferă nici o deformare.

Acest procedeu prezintă inconvenientul că sudarea trebuie efectuată sub vid. Scoaterea afară a fasciculului printr-o ecluză pneumatică în aer ar produce o dispersie prea mare a fasciculului și în consecință o lățire a cusăturii sudate.

Prin evaporarea succesivă a materialului, se pot produce orificii foarte fine, a căror formă depinde însă în foarte mare măsură de secțiunea transversală a fasciculului, precum și de condițiile de focalizare.

Sudarea cu fascicul de lumină (laser)

Un fascicul de lumină (laser) poate fi folosit pentru sudat (fig. 11.35). Acest procedeu s-a dovedit a fi deosebit de valoros la microsudarea unor elemente electronice miniaturizate. Fasciculul laser produs de un cristal de rubin sau de un gaz permite o concentrație de energie, care nu poate fi obținută prin nici un alt procedeu. Performanțe mai mari au fost realizate pînă în prezent numai cu operații de descărcare prin impulsuri. Fasciculul circular de mare precizie permite de asemenea tăierea în metale, în rubine și în diamante microorificii cu precizia cerută.

Primul aparat de sudat cu laser, fabricat în Germania (Siemens UBL 5001), care în prezent se găsește pe piață, este adaptat pentru următoarele scopuri:

- fixarea contactelor pe elemente microelectronice;
- fixarea contactelor în scheme imprimate;
- sudarea sîrmelor izolate;
- sudarea unor elemente mici călite fără deformare;
- sudarea elementelor de ceasornice;
- sudarea prin puncte a materialelor plastice;
- sudarea prin puncte a materialelor ceramice;
- sudarea microtermoelementelor;
- calibrarea unor elemente electronice;
- abraziunea de precizie a unor straturi de metal aplicate prin vaporizare.

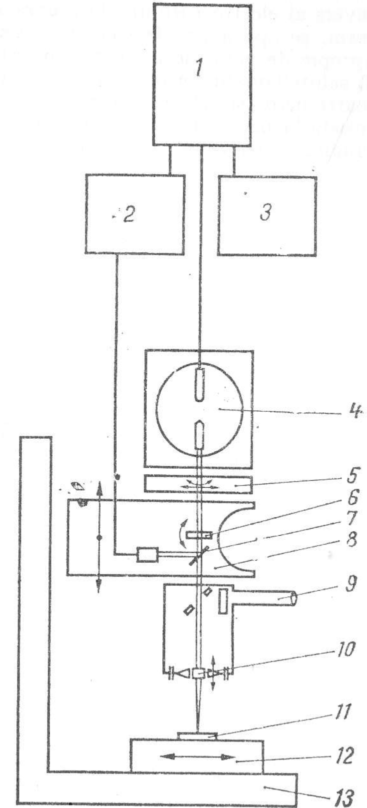


Fig. 11.35. Laser universal pentru prelucrarea materialelor (energia de impuls 10Ws, timpul de impuls 0,4 — 4 ms, frecvența impulsurilor 25 Hz):

1 — legătura la rețea și la elementele *LC*; *2* — regulator pentru energie constantă a laserului; *3* — regulator pentru tensiune înaltă constantă; *4* — lampă de impuls și bară de laser în capul de laser; *5* — reglarea fasciculului; *6* — oglindă exterioară; *7* — divizor de lumină; *8* — suport de fontă; *9* — sistem optic pentru observator cu filtru; *10* — obiectiv pentru observator și pentru laser; *11* — piesă de prelucrat; *12* — suport mobil; *13* — suport fix de fontă.

Încărcare prin scîntei cu descărcarea unui condensator

Procedeul de încărcare prin scîntei cu descărcarea unui condensator este procesul invers al electroeroziunii. Deasupra materialului de placat, de exemplu carbură de wolfram, se aplică un electrod, care execută oscilaţii axiale. Ori de cîte ori electrodul se apropie de piesa de prelucrat, intervine o descărcare dintr-un condensator. Ca rezultat al scînteii produse prin descărcare, o particulă din electrod se dizolvă sub o supraîncălzire foarte mare, suficientă pentru a asigura aderenţa ei pe piesa de lucru, într-un mod care rezistă la uzură. Prin acest proces, durata de serviciu a tăişurilor sculelor poate fi prelungită foarte mult. Înălţimea stratului variază între 1 şi 20 μm.

12. ELECTROCHIMIE

Tabelul 12.1. **Echivalenţi electrochimici** [1])

	Valenţa	Greutatea echivalentă g	Cantitatea depusă (teoretică) g/Ah	Randamentul optim de curent (aproximativ) %
Aluminiu –	3	8,9938	0,33558	85– 98
Cadmiu	2	56,20	2.0970	90–95
Crom	3	17,332	0,64672	—
Crom	6	8,666	0,32336	10– 18
Cupru	1	63,54	2,37090	65– 98
Cupru	2	31,77	1,18545	97–100
Aur	3	65,6556	2,44984	—
Fier	2	27,9235	1,04190	95–100
Fier	3	18,6156	0,69461	—
Plumb	2	103,595	3,86548	95–100
Magneziu –	2	12,156	0,45358	—
Nichel	2	29,355	1,09534	95– 98
Nichel	3	19,57	0,73022	—
Argint	1	107,87	4,02500	98–100
Staniu	2	58,345	2,21437	70– 95
Staniu	4	29,6725	1,10718	70– 95
Zinc	2	32,685	1,21959	85– 98
Hidroxid de potasiu	1	56,10937	2,0936	95
Hidroxid de sodiu	1	39,99717	1,49243	95
Clor	1	35,453	1,32287	95
Hidrogen	1	1,00797	0,037610	100
Oxigen	2	7,9997	0,29850	100

[1]) Raportaţi la izotopul $^{12}C = 12,000$.

12.1. TEHNICA GALVANIZĂRII

În procesele de galvanizare, straturile de metal se depun în special pe metale de bază, în scopul asigurării unei mai bune protecţii împotriva coroziunii, pentru a se mări rezistenţa la uzură şi pentru a se îmbunătăţi aspectul. Pentru mărirea gradului de reflexie a metalului, în special în cazul aluminiului pur folosit la oglinzi, se folosesc procedee speciale.

Procesele de galvanizare se combină cu cele de degresare, de decapare şi de spălare, în funcţie de tipul şi numărul de piese ce trebuie tratate. Se folosesc următoarele tipuri de băi (v. tab. 12.3):

— băi statice;
— băi mobile (rotative sau tobe);
— băi statice cu mişcarea pieselor (băi cu mişcare, băi circulare, instalaţii automate în linie, instalaţii automate ciclice).

Transformarea gradelor Baumé (°Bé) *în kg/l*

$$\rho = \frac{m}{m - {}^\circ\text{Bé}} \text{ kg/l pentru produse mai grele decît apa;}$$

$$\rho = \frac{m}{m + {}^\circ\text{Bé}} \text{ kg/l pentru produse mai uşoare decît apa.}$$

în Germania: $m = 144{,}3$;
în S U A $m = 145$;
în Olanda $m = 144$;
după scara nouă Gerlach $m = 146{,}78$.

Oxidarea electrolitică a aluminiului (ELOXAL)

Tabelul 12.2. Grosimea stratului şi consumul de putere în cazul straturilor de eloxare pe aluminiu pur

Procesul	Grosimea stratului µm	Tensiunea băii V	Densitatea de curent A/dm²	kWh/m² pentru 15 µm
GS	≈ 25–30	13	1,6	1–1,5
GX	≈ 25	60	1	4–5
WX	≈ 15	40	2	6–8

Proprietăţile speciale ale stratului de oxid sînt: porozitatea fină, culoarea, rezistenţa mare la coroziune şi uzură, efectul decorativ şi izolarea electrică stabilă.

Procedeul are un domeniu larg de aplicare, de exemplu: în industriile chimică, farmaceutică şi alimentară; pentru acoperirea interioară sau exterioară a multora dintre uneltele folosite curent, a multor articole cu aplicaţii industriale şi casnice; pentru imprimări, ca de exemplu la scalele aparatelor de măsurat, diagrame mecanice, panouri, rigle de calcul etc; pentru acoperirea conductoarelor electrice care devin termo-stabile, pregnarea cu săruri fotosensibile, în procese fotografice SEO; pentru vopsiri sau impricu condiţia ca tensiunea de lucru să nu fie prea ridicată.

Tabelul 12.3. Caracteristici principale a diferite băi de galvanizare

Tipul băii		Densitatea băii °Bé	Temperatura băii °C	Tensiunea la electrozi V	Densitatea la curent A/dm²	Grosimea depunerii µm/h	Grosimea minimă admisibilă a stratului µm	Randamentul curentului catodic %
Plumb	acidă	10–11	20–40	0,5–1,0	0,5–1,0	17,04–34,08	10	98–100
Crom (lucios)	acidă	30–32	40–45	3,8–4,5	10–20	5,48–10,93	0,3–1	12
Crom (dur)	acidă	22	50–55	4–12	30–60	24,59–49,19	24–400	18
Cupru	acidă	18–20	20–45	1,5–2	3–6	39,03–78,07	6–150	98
Nichel	acidă	25	20–45	1,5–6	1–3	18,45–73,80	3–48	95
Nichel, în tobă	acidă	20–24	20–50	6–8	0,5–1	5,57–11,13	3–24	90
Staniu	alcalină	1,5–2	60–80	2,5–3,5	1–2	12,93–25,86	6–24	85
Staniu	acidă	10–11	18–24	0,5–1,5	1–4	28,89–115,56	24	95
Zinc	acidă	25	18–30	2–4,5	1–2,5	16,91–42,27	3–48	99
Cadmiu (lucios)		14	18–20	1,5–4,5	1–2	23,03–46,06	3–24	95
Cadmiu, în tobă		21	18–25	7–14	0,8–1,0	13,36–16,99	3–12	70
Cupru		21	20	1,5–4	0,3–0,5	5,30–8,84	6–12	75
Alamă		17–18	20–24	2,5–3,5	0,3–0,5	5,18–8,63	6–24	70
Argint		3	20	0,5–2	0,2–0,3	7,28–10,92	6–48	95
Argint (lucios)		13	20–30	0,5–1,5	0,5–1,5	18,78–56,34	6–48	98
Zinc		15	18–20	2–4	1–4	14,52–58,08	3–48	85
Zinc, în clopot		22	24–30	9–15	1	11,96	6–24	70

Notă. Electrolitul este cianura de potasiu.

12.2. DIFERITE PROCEDEE ELECTROCHIMICE

Tabelul 12.4. Procedee electrolitice

Clasificare	Produse	Procedeul	Compoziția băii	Tensiunea V	Randamentul curentului %	Necesarul de energie
Procedee electrolitice nemetalurgice	$NaOH$, Cl_2, H_2	Electroliza clorurilor alcaline: 1. Procedeul cu electrod de mercur 2. Procedeul cu diafragmă a) procedeu cu diafragramă orizontală (procedeul Siemens-Billiter) b) procedeul cu diafragmă verticală (de ex. cu elemente Gibbs și Townsend) 3. Procedeul prin stratificare a) cu clopot Aussig b) procedeu cu ecran contra gazelor	300 g/l clorură alcalină	3,8–4,8	8,7–9,5	3,3–3,6 kWh/kg NaOH
	H_2, O_2	Electroliza apoasă: 1. Cu elemente unipolare (de ex. celule clopot) 2. Celule bipolare (de ex. celule de trecere, tancuri de descompunere de tipul filtru-presă, sau circulare)	Densități ale hidroxidului de potasiu 1,24–1,26 (180° C)	1,8–2,4	99	4,1–5,3 kWh/m³ H_2 + 1/2 m³O_2
	$NaClO_3$ H_2O_2 Perborat de Na (ozon)	Electroliza cloratului de sodiu Procedeul Weissenstein Procedeul Muenchen Procedeul Riedel-Loewenstein	250 g NaCl/l Acid sulfuric Amoniac Sulfat acid	2,5–4 5	75–90 85	6 kWh/kg $NaClO_3$ 13–20 kWh/kg H_2O_2 (35%) 5,2 kWh/kg 10–20 kWh/kg (O_3)
Electrometalurgia soluțiilor apoase	Cu Cupru electrolitic	1. Procedeu cu anozi solubili (rafinarea cuprului) 2. Procedeu cu anozi insolubili	Acid sulfuric Soluție de $CuSO_4$	0,15–0,3 2,5 –3	90–95	0,2–0,3 kWh/kg 2,5–3 kWh/kg
	Zn Zinc electrolitic	1. Procedeul Anaconda, densitate de curent scăzută, conținut scăzut de H_2SO_4 în electrolit 2. Procedeul Tainton, densitate de curent mare, conținut mare de H_2SO_4 în electrolit 3. Procedeul combinat	Soluție de $ZnSO_4$	3–4	≈ 90	3,5–4 kWh/kg
	Pb Plumb electrolitic	Variante ale procedeului Bett	Soluție de fluorosilicat, fluoroborat sau perclorat de plumb	0,4–0,7	85–95	0,18 kWh/kg
	Fe Fier electrolitic	1. Procedeu acid cu anozi solubili (rafinare) 2. Procedeu Estelle		3–4 1,6–1,8	90	3–3,5 kWh/kg
	Sn Staniu electrolitic	1. Procedeu acid cu anozi solubili (rafinare) 2. Procedeu de îndepărtare a staniului	Soluție de H_2SO_4 Soluție stanică	0,5 2	80	0 ,2kWh/kg 1,8 kWh/kg
	Ag Ag rafinat	1. Procedeul Moebius 2. Procedeul Siemens-Moebius	Acid azotic	2–2,5	95	0,5–0,7 kWh/kg
	Au Aur rafinat	Procedeul Siemens-Wohlwill	Soluție de HCl	≈ 1		0,6 kWh/kg
Electroliza maselor topite	Al		Aluminiu topit în criolit ≈ ≈ 950 °C	4,1–6,5	95	17–20 kWh/kg
	Mg		$MgCl_2$ cu substanțe alcaline și cloruri alcalino-pămîntoase	7–7,5	90	20 kWh/kg
	Na		NaCl	7	85	10–12 kWh/kg

Procedeul VOLTOL pentru tratamentul uleiurilor

Un alt domeniu de aplicare a reacţiilor electrochimice, implicînd folosirea vacuumului este procedeul VOLTOL.
Frecvenţa 500—10 000 Hz; tensiunea 5 000 V.

Producerea ozonului

O_3 (o variantă chimic-activă a oxigenului).
Din considerente economice, procesul tehnologic preferabil pentru producerea ozonului este cel cu ajutorul descărcărilor statice, folosindu-se:
— aerul;
— oxigenul.
Frecvenţa 50—10 000 Hz; tensiunea 8—10 kV. Puterea necesară pentru aer foarte bine uscat este de aproximativ 20 Wh/g de O_3. Puterea necesară pentru oxigen bine uscat este de circa 10 Wh/g de O_3. Cu creşterea frecvenţei creşte de asemenea şi productivitatea.

Aplicaţiile produselor de la electroliză

Clorul: fabricarea clorului lichid şi folosirea lui ulterioară în uzinele de produse organice sau anorganice ale industriei chimice; fabricarea clorurii de var; fabricarea soluţiei decolorante din lapte de var sau concomitent a soluţiei de hidroxid de potasiu; producerea acidului clorhidric din H_2 şi Cl_2 degajate concomitent.

Soluţia de hidroxid de sodiu: fabricarea soluţiei de concentraţie comercială de aproximativ 700 g/l cu ajutorul concentrării ulterioare sau fabricarea alcaliilor solide prin topire.

Hidrogenul: hidrogenul este folosit în procesele de hidrogenare cu precădere la hidrogenarea grăsimilor şi a uleiurilor, în procesele metalurgice ca gaz de protecţie, la sudarea şi tăierea autogenă şi ca combustibil în pilele de combustie.

Oxigenul: oxigenul este de asemenea folosit la sudarea şi tăierea autogenă, în instalaţii de respiraţie artificială, diferite procedee de oxidare, de exemplu în pilele de combustie etc.

Ozonul: se utilizează pentru intensificarea şi accelerarea proceselor de oxidare ca de exemplu: la purificarea aerului în încăperi; pentru sterilizarea aerului în abatoare şi camere de răcire; pentru sterilizarea apei potabile.

În scopuri medicale (pentru tratarea rănilor şi pentru inhalaţii). În industria chimică (uscarea vopselelor, îmbătrînirea artificială a alcoolului şi vîscozei, producerea vanilinei, decolorare etc.).

Voltolul: este folosit la fabricarea uleiurilor lubrifiante de înaltă calitate şi a uleiurilor pentru scopuri speciale.

12.3. PILE DE COMBUSTIE

În pilele de combustie electrochimice, energia chimică este transformată direct în energie electrică, adică fără a se trece prin etape de randament scăzut de energie calorică sau mecanică, ca în cazul motoarelor termice.

Tensiunea pilei este determinată de către afinitatea A a componentelor din reacţie. În cazul unui proces experimental izotermic şi reversibil, sub presiune constantă, oxidarea combustibililor utilizaţi (hidrogen, hidrazină, hidrocarburi etc.) se va realiza cu o utilizare maximă a energiei libere de reacţie ΔG. În limbaj termodinamic această cantitate este raportată la entalpia ΔH şi entropia ΔS, conform ecuaţiei:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = -nFE$$

în care E, defineşte t.e.m. iar $-T\Delta S'$, pierderea sau cîştigul de energie, rezultată din încălzirea sau răcirea pilei. Deoarece t.e.m. $E = -U$ este egală cu tensiunea fără sarcină, negativă, a pilei, tensiunea teoretică U este calculată din entalpia ΔH şi entropia ΔS. În cazul unui proces reversibil şi izotermic (pentru unităţi v. tab. 12.5):

$$U = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{\Delta G}{n\,23{,}06} \quad \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kcal/V}} = \text{V}\right]$$

în care n este numărul echivalentului electrochimic şi F (constanta lui Faraday) = 96487 As/echivalent = 26802 Ah/echivalent.

Tensiunile pilei pentru cîteva din cele mai importante reacţii sînt date în tabelul 12.5.

Randamentul termodinamic sau termic al unei pile de combustie galvanică este dat de

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta G + T\Delta S} = \frac{U_n F}{\Delta H}$$

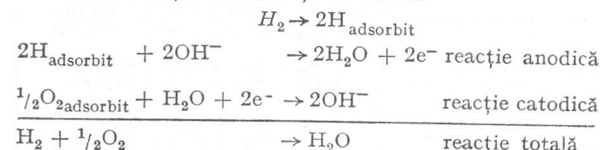
Valoarea randamentului η este funcţie de starea gazoasă (g) sau lichidă (fl), în care se prezintă apa ca produs al combustiei.

Randamentul electrochimic se obţine din raportul tensiunii la bornele pilei U_{ef}, care este o funcţie de încărcarea pilei şi tensiunea teoretică ΔG sau U.

$$\eta^* = \frac{U_{ef} nF}{\Delta G} = \frac{U_{ef}}{U}$$

Principiul de funcţionare a pilei

Principiul de funcţionare a pilei va fi explicat pe baza exemplului pilei de hidrogen-oxigen (fig. 12.1). Între doi electrozi poroşi este interpus un electrolit cu conductivitate bună (de exemplu 6N KOH, H_2SO_4, H_3PO_4, v. fig. 12.2). Fig. 12.3 reprezintă dependenţa solubilităţii şi punctului de fierbere în raport cu concentraţia, în % de greutate, a soluţiei de KOH la o presiune de 1 atm. Anodul (polul negativ) este înconjurat de hidrogen la o anumită presiune, iar catodul (polul pozitiv) de către oxigen. Între cei doi poli ai acestei pile apare la temperatura mediului ambiant o tensiune în gol de circa 1,15 V. Apar următoarele reacţii la anod şi la catod:



$$H_2 \rightarrow 2H_{adsorbit}$$

$$2H_{adsorbit} + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^- \quad \text{reacţie anodică}$$

$${}^1/_2 O_{2adsorbit} + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- \quad \text{reacţie catodică}$$

$$H_2 + {}^1/_2 O_2 \rightarrow H_2O \quad \text{reacţie totală}$$

* 1 Joule = 0,239 cal/Ws = 0,239 cal/CP

$$F = 0{,}239 \times 96\,487 = 23{,}06 \; \frac{\text{cal C}}{\text{CP} \times \text{echivalent electrochimic}}$$

Tabelul 12.5. **Caracteristici termodinamice privind cele mai importante reacţii în pile. Tensiunile pilelor şi randamentele termice**

Combustibil	Reacţiile din pile	ΔH kcal/mol	ΔS cal/(mol × grd)	ΔG la 25°C kcal/mol	Echivalentul electrochimic n	U la 25 °C V	U la 100 °C V	$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H}$ la 25°C (%)
Amoniac	$NH_3 + {}^3/_4O_2 \rightarrow N_2 + {}^3/_2H_2O(fl)$	− 91,440	− 34,797	− 81,071	3	1,172	1,134	88,6
Benzen	$C_6H_6 + 7{}^1/_2O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O(g)$	− 757,532	+ 9,834	− 760,462	30	1,099	1,100	100,3
Benzen	$C_6H_6 + 7{}^1/_2O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O(fl)$	− 789,092	− 75,336	− 766,642	30	1,108	1,100	97,1
Carbon (grafit)	$C + {}^1/_2O_2 \rightarrow CO$	− 26,416	+ 21,439	− 32,804	2	0,711	0,746	124,1
Carbon (grafit)	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	− 94,052	+ 0,697	− 94,259	4	1,02	1,02	100,2
Monoxid de carbon	$CO + {}^1/_2O_2 \rightarrow CO_2$	− 67,636	− 20,741	− 61,456	2	1,33	1,299	90,8
Etilenă	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O(g)$	− 316,200	− 7,207	− 314,053	12	1,134	1,15	99,3
Etilenă	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O(fl)$	− 337,240	− 63,987	− 318,172	12	1,149	1,15	94,3
Etan	$C_2H_6 + 3{}^1/_2O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O(g)$	− 341,268	+ 11,092	− 344,573	14	1,067	1,0698	100,9
Etan	$C_2H_6 + 3{}^1/_2O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O(fl)$	− 372,828	− 74,078	− 350,753	14	1,086	1,069	94
Acid formic	$HCOOH + {}^1/_2O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O(g)$	− 54,052	+ 40,850	− 66,225	2	1,435	1,052	122,5
Acid formic	$HCOOH + {}^1/_2O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O(fl)$	− 64,572	+ 12,460	− 68,285	2	1,480	1,502	105,7
Formaldehidă	$CH_2O + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O(g)$	− 124,152	− 5,092	− 122,635	4	1,329	1,325	98,7
Formaldehidă	$CH_2O + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O(fl)$	− 134,672	− 33,482	− 124,695	4	1,351	1,325	92,5
Glicol	$C_2H_6O_2 + 2{}^1/_2O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O(g)$	− 252,924	+ 75,045	− 275,287	10	1,193	1,218	108,8
Glicol	$C_2H_6O_2 + 2{}^1/_2O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O(fl)$	− 284,484	− 10,125	− 281,467	10	1,220	1,218	98,9
Hidrazină	$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O(fl)$	− 148,690	+ 1,254	− 149,063	4	1,616	1,617	100,2
Hidrogen	$H_2 + {}^1/_2O_2 \rightarrow H_2O(g)$	− 57,800	− 10,601	− 54,641	2	1,185	1,167	94,5
Hidrogen	$H_2 + {}^1/_2O_2 \rightarrow H_2O(fl)$	− 68 320	− 38,991	− 56,701	2	1,229	1,167	82,9
Hidrogen	$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl(g)$	− 44,120	+ 4,740	− 45,532	2	0,987	0,995	103,2
Hidrogen	$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl(aq)$	− 80,040	− 58,160	− 62,709	2	1,356	1,265	78,3
Metan	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(g)$	− 191,763	− 1,225	− 191,398	8	1,0375	1,037	99,8
Metan	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(fl)$	− 212,803	− 58,005	− 195,518	8	1,0598	1,036	91,8
Metanol	$CH_3OH + 1{}^1/_2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(g)$	− 152,632	+ 37,477	− 163,800	6	1,183	1,204	107,3
Metanol	$CH_3OH + 1{}^1/_2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(fl)$	− 173,672	− 19,303	− 167,920	6	1,213	1,204	96,6
n-Butan	$C_4H_{10} + 6{}^1/_2O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O(g)$	− 635,396	+ 37,175	− 646,474	26	1,078	1,08	101,7
n-Butan	$C_4H_{10} + 6{}^1/_2O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O(fl)$	− 687,996	− 104,775	− 656,774	26	1,095	1,08	95,4
n-Hexan	$C_6H_{14} + 9{}^1/_2O_2 \rightarrow 6CO_2 + 7H_2O(g)$	− 928,952	+ 64,158	− 948,071	38	1,08	1,087	102
n-Hexan	$C_6H_{14} + 9{}^1/_2O_2 \rightarrow 6CO_2 + 7H_2O(fl)$	− 1002,592	− 134,572	− 962,490	38	1,098	1,087	96
n-Octan	$C_8H_{18} + 12{}^1/_2O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O(g)$	− 1222,796	+ 91,121	− 1249,950	50	1,084	1,090	102,2
n-Octan	$C_8H_{18} + 12{}^1/_2O_2 \rightarrow 8CO_2 + 9H_2O(fl)$	− 1317,476	− 164,389	− 1268,489	50	1,100	1,090	96,2
n-Pentan	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O(g)$	− 782,060	+ 50,671	− 797,159	32	1,080	1,085	101,9
n-Pentan	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O(fl)$	− 845,180	− 119,669	− 809,519	32	1,097	1,085	95,7
Propan	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O(g)$	− 488,536	+ 24,098	− 495,717	20	1,075	1,078	101,4
Propan	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O(fl)$	− 530,616	− 89,462	− 503,957	20	1,09	1,078	94,9
Sodiu	$Na + {}^1/_2H_2O + {}^1/_4O_2 \rightarrow NaOH(aq)$	− 78,080	− 20,910	− 71,849	1	3,116	3,047	92
Zinc	$Zn + {}^1/_2O_2 \rightarrow ZnO$	− 83,170	− 23,951	− 76,033	2	1,649	1,609	91,4

Factorul de transformare pentru calorii în Joule internaţional: 1 cal (15 °C) = 4,18933 Joule internaţionale; 1 cal (20 °C) = 4,18121 Joule internaţional; (g) — gaz; (fl) — lichid; (aq) — apos.

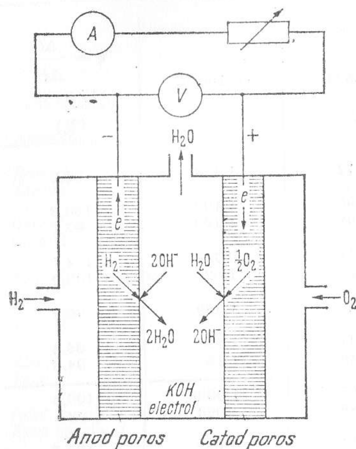


Fig. 12.1. Principiul funcționării pilei de combustie H_2/O_2.

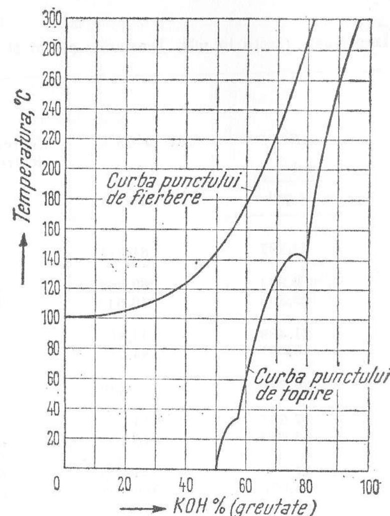


Fig. 12.3. Dependența solubilității și punctului de fierbere de concentrație, în %, a soluției de KOH la 1 at.

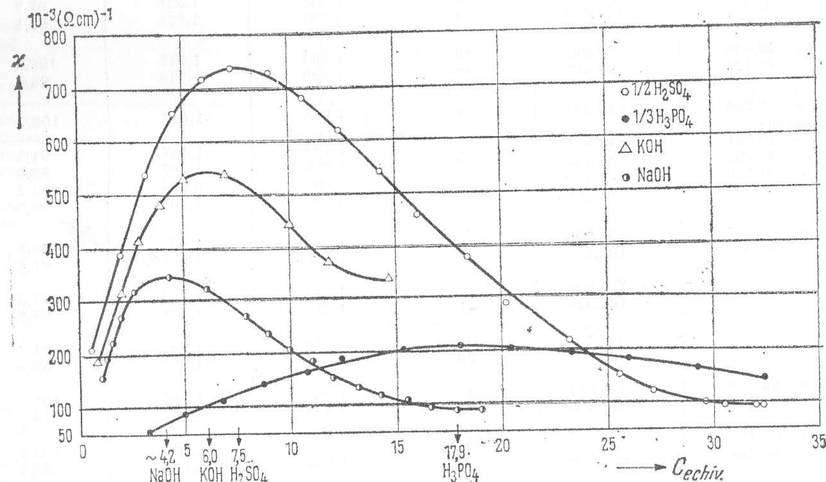


Fig. 12.2. Conductivitatea diferiților electroliți pentru pile. Conductivitatea specifică $\varkappa$ ca funcție de C_{echiv} la 18°C.

Catalizatori adecvați, în afară de platină și argint, sînt spinelii ca de exemplu: $CoAl_2O_4$ sau compușii cu Fe-Mn-Ag încorporați în electrozi de carbon poros. Metalele din grupa fierului și a platinei din tabelul lui Mendeleev, folosite drept catalizatori pentru electrodul de hidrogen s-au dovedit a fi cele mai satisfăcătoare, acești catalizatori reglînd foarte bine potențialul reversibil calculat al hidrogenului.

Tipuri de electrozi și pile

În legătură cu cataliza, structura geometrică a electrozilor este un factor critic. Se deosebesc două tipuri de electrozi în concordanță cu tipul proceselor care apar la fiecare din ei:

— electrozi poroși cu trei faze de separație (gazul de reacție/electrod/electrolit);

— electrozi cu suprafață mare cu două faze de separație (amestec de electrolit cu combustibil/electrod și gazul de reacție-electrod/electrolit) (v. fig. 12.4).

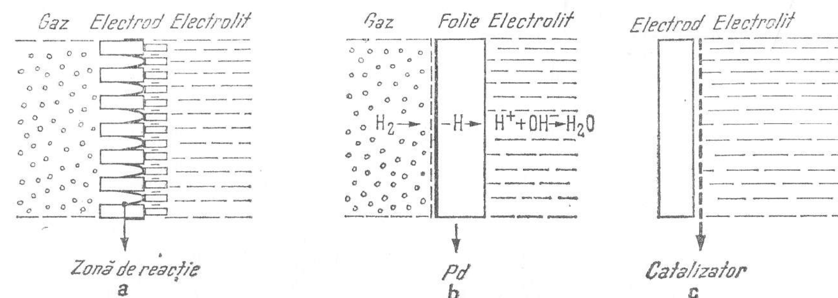


Fig. 12.4. Electrozi cu două sau trei faze de separație, arătînd tipurile de reacție în care se produce curentul și tensiunea:

a — electrod cu dublu strat și trei faze de separație (gaz de reacție/electrod/electrolit : $H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$); b — electrod din folie cu două faze de separație (gaz de reacție/electrod/electrolit); c — electrod cu două faze de separație (electrod/amestec electrolit-combustibil).

Electrozii poroși sînt aproape fără excepție construiți ca electrozi cu dublu strat pentru a asigura o degajare gazoasă de 100%.

Fig. 12.5 reprezintă curbele curent/tensiune ale electrodului de pulbere catalitică cu straturi de acoperire și suport pentru operații de hidrogen (la 23°C și 1,3 at). Sarcina pe electrod (mA/cm²) poate fi mărită substanțial printr-un tratament prealabil adecvat al catalizatorului.

Principiul de bază și dotarea pilei cu electrozi cu suprafața mare de difuzie a gazului (electrozi suport) realizat de Siemens, sînt reprezentate în fig. 12.6. Curba curent-tensiune și randamentul într-o pilă cu hidrazină-oxigen, construită de Siemens — model

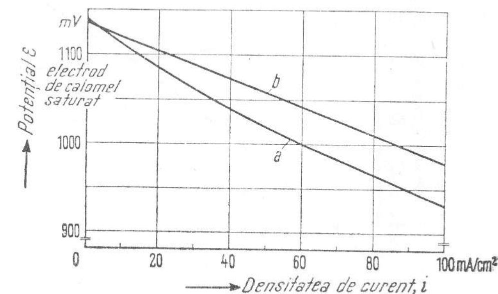


Fig. 12.5. Curbă curent-tensiune a anozilor de hidrogen: a — catalizator netratat; b — catalizator pretratat.

în scopul ilustrării demonstrative şi în scopuri didactice — poate fi văzută în fig. 12.7. Anodul pilei este construit în formă de plasă metalică (cu două faze de separaţie) iar catodul din carbon poros (cu trei faze de separaţie) după principiul electrodului suport.

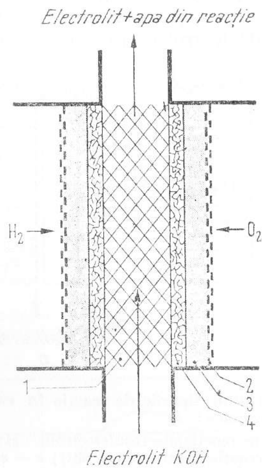


Fig. 12.6. Alcătuirea unei pile cu electrod suport cu pulbere catalitică: *1* — scheletul-suport; *2* — grila de nichel; *3* — catalizator; *4* — hîrtie de azbest.

În timp ce combustibilul hidrazină este adăugat la electrolit şi circulă spre anod, catodul se alimentează cu oxigen la o presiune de 1,4 at.

Clasificarea pilelor de cumbustie se poate face după un număr mare de criterii. Cîteva date caracteristice şi tipuri au fost rezumate în tabelele 12.6 şi 12.7. Aceste tabele nu se pot considera însă complete.

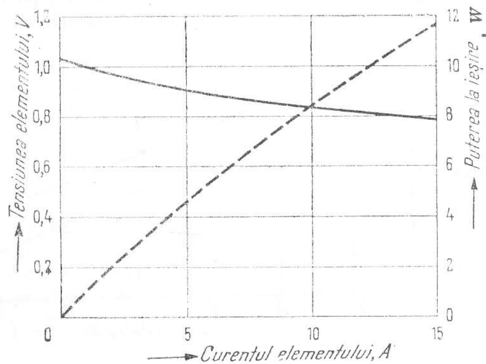


Fig. 12.7. Curba curent-tensiune şi randamentul dependent al curentului pilei pentru o pilă de combustie cu hidrazină-oxigen.

Tabelul 12.6 Clasificarea pilelor de combustie în funcţie de temperatură

Tipul pilei de combustie	Domeniul de temperatură °C	Electrozii	Electroliţii	Combustibilul	Agentul oxidant
Pile de temperatură joasă	0 — 150	Electrozi de cărbune poros şi metal cu trei zone de separaţie, electrozi de metal şi cărbune cu înveliş catalitic şi două zone de separaţie	5 — 12 n KOH 5 — 6 n H_2SO_4 3 — 6 n H_3PO_4 Membrană schimbătoare de ioni $HClO_4$	H_2, hidrazină H_2H_4, amalgam de sodiu, propan şi alte hidrocarburi, alcooli, aldehide	O_2, aer H_2O_2, Cl_2 Br, NO_2, $HClO_3$ HBO_3
Pile de temperatură medie	150 — 250	Anod: electrozi de nichel poros, electrod Pd sau folie Pd-Ag. Catod: electrozi Ni-NiO (îmbogăţit cu Li)	45 % KOH la 28,5 at sau 80—85% KOH la 2—3 at presiune a gazului NaOH-KOH topitura eutectică	H_2 (pur) Electrozi folie, gaz de reforming, gaz de huilă	O_2 (pur) O_2 (aer)
Pile de temperatură înaltă	550 — 800	Electrozi de Ni, Co, Fe, Cu şi Ag/ZnO	Topituri de carbonaţi (eutectic) în formă de pastă sau MgO aglomerat	H_2 (impur) CO, hidrocarburi	O_2 (impur) Aer
Pile de temperatură foarte înaltă	800 — 1100	Electrozi de Pt	Electrolit solid constînd din ZrO_2 cu CaO şi Y_2O_3	H_2 (impur) CO, hidrocarburi	Aer

Tabelul 12.7. **Proveniența și capacitățile diferitelor tipuri de pile de combustie**

Tipul pilei de combustie	Anodul	Catodul	Electrolitul	Temperatura de lucru °C	Presiunea gazului at	Densitatea de curent mA/cm²	Tensiunea pilei V	Elemente construite sau planificate
F.T. Bacon Pilă de combustie H_2/O_2	Electrod poros de Ni în dublu strat	Electrod poros de Ni-NiO (îmbogățit cu Li)	45% KOH	200–250	29,5	200	0,6	5 kW
Pratt și Whitney Pilă de combustie H_2/O_2 din proiectul Apollo Pilă de combustie gaz natural/aer	Anod Bacon modificat	Catod Bacon modificat Catod Ni-Co	85% KOH	200	2	200	0,9	560–1420 W/24 V 360 kWh 4 kW
E. Justi și A. Winsel Electrozi DSK Pilă de combustie H_2/O_2	Electrod Ni-DSK	Electrod de argint-DSK	6 n KOH	20–85	2–3	50–100	0,6–0,9	
Varta Pilă de combustie H_2/O_2 Metanol/O_2	Electrod Ni-DSK	Electrod de argint	6 n KOH	20–85	2–3	50–100	0,8	50 W/6 V 250/750 W/12 V 1,5/5/10 kW/24 V 35 W/6 V
Siemens AG Pilă de combustie H_2/O_2 Hidrazină/O_2	Electrod suport cu pulbere catalitică Platină pe grilă metalică	Electrod suport cu pulbere catalitică Cărbune (Ag)	6 n KOH 6 n KOH + N_2H_4	20–60 20–60	1,2–1,7 1,4	50–100 30–100	0,8–0,9 0,5–0,9	500 W/24 V 10 W/0,7 V
E. Yeager Pilă amalgam	Oțel + Na-amalgam	Cărbune poros	6 n KOH	60	—	400	1,4	16 kW/10 V
Union Carbide K. Kordesch Pile de combustie H_2/O_2, H_2/aer, hidrazină/aer	Electrod de cărbune poros hidrofobizat pe Ni cu platină	Electrod de cărbune poros hidrofobizat pe Ni cu spineli Ag, Pt	6–9 n KOH	20–60	1,5–2	50–200	0,82 0,76	500 W/28 V 30 kW/400 V 4 kW/28 V 300 W
General electric Proiectul Gemini a) Grubb și Niedrach Pilă de combustie cu membrană schimbătoare de ioni H_2/O_2	Electrozi din platină poroasă 8,8 mg Pt/cm²	Electrozi de platină poroasă 8,8 mg Pt/cm²	Cationi	20–60	1,55–1,62	30–50	0,7	1 kW/26 V 1,5 kW
b) Niedrach, Liebhavsky Pilă de combustie Young KW	Electrozi de platină poroasă	Electrozi de platină poroasă	3 n H_2SO_4 sau H_3PO_4	90–150	1,5	15–90	0,5	
Allis Chalmers Pile de combustie H_2/O_2 N_2H_4/O_2	Nichel sinterizat cu Pt și Pd Idem	Nichel sinterizat cu Pt și Pd Ag și Ni sinterizat (hidrofobizat)	6 n KOH și azbest ca purtător al electrolitului	20–80 70–80	1,5–2	190–210 100–200	0,8 0,6–0,7	200 W/30 V 4 unități 450–700 W
ASEA – Suedia Pilă de combustie H_2/O_2	Nichel sinterizat cu borați de Ni	Nichel sinterizat cu Ag sau Pd-Ag	6 n KOH	70–80	2–2,5	80–120	0,7	5 kW 200 kW/24 V pentru submarine
Brown Boveri (Elveția) Pilă de combustie H_2/O_2	Platină pe metal poros 1–3 mg Pt/cm² (Raney-Ni monoskeleton MSK)	Cărbune hidrofobizat	10 n KOH + 4,5 mg CH_3OH 6 n KOH	5–30	—	2–10	0,4–0,8	50 W 3 kW
CGE (Franța)	Electrod de Ag-Ni	Electrod de Ag-Ni poros	6 n KOH	60–80	2–3	250	0,75	1 kW

Domeniul de aplicaţie al pilelor de combustie

Pilele de combustie sînt folosite: ca înlocuitori ai bateriilor de acumulatoare şi ai pilelor clasice; ca o nouă sursă de energie în zborurile spaţiale, avînd un randament mare şi o bună siguranţă în funcţionare, de exemplu în cazul proiectelor Gemini şi Apollo, în SUA; ca ansambluri independente fixe, în locuri greu accesibile, de exemplu în cazul staţiilor de relee radio şi TV, în instalaţii de semnalizare, staţii radio şi meteo; în ansambluri de alimentare improvizate; ca înlocuitoare ale motoarelor cu ardere internă ale autovehiculelor comerciale, navelor de pasageri, submarinelor, tractoarelor, autoîncărcătoarelor, încărcătoarelor cu braţ; în staţiile de acumulare prin pompare etc.

12.4. BATERII DE ACUMULATOARE

Pilele galvanice, în care reacţia care rezultă în timpul debitării curentului, poate fi realizată aproape complet reversibilă prin reîncărcare ulterioară, se numesc baterii de acumulatoare sau acumulatoare.

Acumulatoare cu plăci de plumb. Următoarele valori se aplică stării de repaus, atunci cînd nu are loc nici încărcare şi nici descărcare (debitare):

— tensiunea în gol corespunzătoare densităţii acidului (în kg/dm^3): + 0,85 V;

— densitatea acidului (în kg/dm^3) corespunzătoare tensiunii în gol: — 0,85 V.

În scopul compensării variaţiilor de tensiune în timpul încărcării şi descărcării, se folosesc regulatoare de comutare. Încărcarea automată se efectuează cu ajutorul comutatoarelor Pohler şi Siemens (acestea însă nu corespund întru totul acumulatoarelor alcaline).

Tabelul 12.8. **Capacitatea la diferiţi timpi de descărcare raportată la o perioadă de descărcare de trei ore**

Durata de descărcare, h	1	2	3	5	7,5	10
Capacitatea, Ah	0,69	0,83	1	1,11	1,25	1,33
Tensiunea finală, V	1,75	1,75	1,83	1,83	1,83	1,83

Tabelul 12.9. **Punctele de îngheţ ale acumulatoarelor**

	Unitatea de măsură	Încărcat	Semiîncărcat	Descărcat
Densitatea acidului	°Bé [2]) kg/dm^3	32 (27) [3]) 1,285 (1,23)	23 (18) 1,19 (1,14)	16...14 (11...9) 1,12...1,11 (1,08...1,06)
Punctul de [1]) îngheţ	°C	— 65 (— 40)	— 23 (— 13)	—11...—9 (—6...—4)

Trebuie respectate instrucţiunile de exploatare a acumulatoarelor, ale furnizorului.
Camera acumulatoarelor sau magazia trebuie să fie bine ventilată (se degajează oxigen şi hidrogen).
[1]) Cifrele în paranteze sînt aplicabile la tropice.
[2]) Măsurat cu hidrometrul.
[3]) La 20°C.

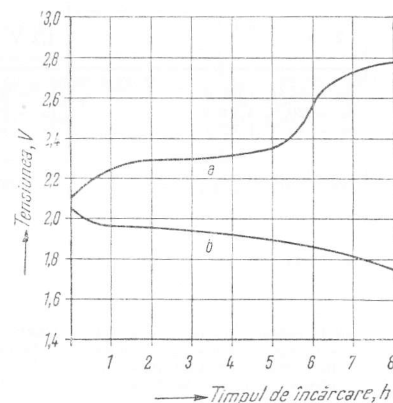


Fig. 12.8. Variaţia tensiunii în timp la acumulatoarele cu plăci de plumb: *a* — încărcare; *b* — descărcare (debitare).

Acidul acumulatorului. La electrozi nesulfataţi, densitatea acidului pentru un acumulator în stare de repaus este un indiciu al stării de încărcare. Acumulatoarele trebuie protejate împotriva îngheţului, deoarece acumulatorul îngheţat nu debitează curent.

În general, îngheţul nu dăunează atîta timp cît acidul nu distruge elementele iar acumulatoarele pot funcţiona normal şi după dezgheţare. Pentru punctele de îngheţ v. tabelul 12.9.

Tabelul 12.10. **Structura, date de exploatare şi caracteristicile acumulatoarelor**

Structura şi date de exploatare	Acumulatoare cu plăci de plumb	Acumulatoare nichel-cadmiu (cu electrozi casete)	Acumulatoare nichel-cadmiu (cu electrozi sinterizaţi)	Acumulatoare Edison (feronichel)	**Acumulatoare argint-zinc**	**Acumulatoare argint-cadmiu**
Pila	Pilă în înveliş plastic, sticlă sau ebonită cu electrozi pozitivi armaţi şi grilă negativă	Pilă în înveliş de oţel nichelat cu electrozi casete pozitiv şi negativ	Pilă cu înveliş de oţel nichelat şi electrozi sinterizaţi	Pilă cu înveliş de oţel şi electrozi pozitiv şi negativ	**Pilă cu electrozi masivi negativ şi pozitiv în înveliş de material plastic**	
Electrodul pozitiv	Bioxid de Pb (PbO_2)	Oxihidrat de nichel (NiOOH)		Trioxid de Ni (Ni_2O_3)	**Mono şi bioxid de argint $Ag_2O + Ag_2O_2$**	
Electrodul negativ	Plumb (Pb)	Cadmiu (Cd)		Fier (Fe + HgO)	Zinc (Zn)	Cadmiu (Cd)
Electrolitul	Soluţie diluată de acid sulfuric (H_2SO_4) 22°Bé (γ = 1,18)	Soluţie de hidroxid de potasiu	20% KOH (γ = 1,2)		Soluţie alcalină	
Tensiunea în gol complet încărcată	2,1 V	1,3 V	1,3 V	1,4 V	1,86 V	1,4 V
Tensiunea nominală	2 V	1,2 V	1,2 V	1,2 V	1,5 V	1,1 V
Tensiunea la borne după o oră de descărcare [1]) (debitare)	la + 25 °C 1,86 V la − 20 °C 1,84 V la − 40 °C 1,72 V	la + 25 °C 1,05 V la − 25 °C 1,00 V la − 40 °C 0,75 V	la + 25 °C 1,18 V la − 20 °C 1,15 V la − 40 °C 1,08 V	la + 25 °C 0,85 V la − 20 °C − la − 40 °C −	la + 25 °C 1,43 V la − 20 °C 1,27 V la − 40 °C −	la + 25 °C 0,90 V la − 20 °C 0,95 V la − 40 °C 0,77 V
Randament, Ah	200−2000 (aprox.)	> 2000 (aprox.)	> 2000 (aprox.)	> 2000 (aprox.)	10−400 (aprox.)	300−1000 (aprox.)
Capacitate, W/kg	4−8 (11)	3−5	5−7	5−6	11−25	5−17
a) Avantaje	Cost scăzut, domeniu larg de aplicaţie, durată de funcţionare mare, tensiune înaltă pe element, capacitate bună	Foarte bună comportare în exploatare, siguranţă mare pentru vehicule, potrivite pentru condiţii grele de exploatare	Foarte bună comportare, siguranţă mare pentru vehicule, caracteristici bune de încărcare, descărcare la temperatură joasă, aplicabile în condiţii grele de exploatare, pot fi închise ermetic	Foarte bună comportare, aplicabile pentru condiţii foarte grele de exploatare, nu se distrug la suprasarcină sau descărcare intensivă	Capacitate foarte bună raportată la greutate şi volum, caracteristici foarte bune privitor la descărcare intensivă	Putere mare în raport cu greutatea şi volumul, bună comportare în exploatare
b) Dezavantaje	Sensibile la manipulări greşite (şocuri mecanice, supracurenţi, suprasarcini), caracteristici slabe de descărcare la temperatură joasă	Cost ridicat, caracteristici slabe ale curentului de descărcare la temperatură joasă, ciclu slab de descărcare (debitare)	Cost ridicat	Cost ridicat, slabă rezervă de descărcare, caracteristici slabe de descărcare la temperaturi joase	Cost ridicat, slabă comportare şi caracteristici slabe de descărcare la temperaturi joase	Cost ridicat

[1]) Dacă 20% din tensiune este utilizată pentru descărcare (debitare).

13. ALTE APLICAŢII

13.1. TEHNICA ILUMINATULUI

Tabelul 13.1. **Mărimi fotometrice principale şi unităţile lor**

Denumirea şi simbolul mărimii	Unitatea		Relaţia de definiţie [1])	Definiţia
Fluxul luminos Φ....	lumen	lm	$\Phi = K_m \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e}{d\lambda} V_\lambda d\lambda$	Evaluarea fotometrică a fluxului energiei radiante Φ_e (V_λ fiind eficacitatea luminoasă spectrală relativă corespunzătoare lungimii de undă λ)
Intensitatea luminoasă I	candela	cd	$I = \frac{\Phi}{\omega}$	Raportul dintre valoarea fluxului luminos emis de către o sursă într-un unghi solid şi valoarea unghiului solid respectiv
Iluminarea E	lux	lx	$E = \frac{\Phi}{A}$ $E = \frac{I_\varepsilon}{r^2} \cos i$ $E = \frac{I_\varepsilon}{h^2} \cos^3 i$	Raportul dintre fluxul luminos primit de o suprafaţă şi mărimea suprafeţei iluminate A (în m²). Iluminarea poate fi definită şi în funcţie de: intensitatea I a sursei în direcţia suprafeţei iluminate, distanţa r dintre sursă şi suprafaţă (sau înălţimea h dintre poziţia sursei şi orizontala locului iluminat) şi unghiul i de incidenţă al luminii (unghiul ε caracterizează direcţia sursă-suprafaţă iluminată)
Luminanţa L	1 cd/cm² 1 stilb 1 cd/cm² 1 apostilb	sb asb	$L = \frac{\Phi}{\omega A \cos\varepsilon}$ $1\ cd/m^2 = \frac{1}{10^4}\ cd/cm^2$ $1\ asb = \frac{1}{\pi 10^4}\ cd/cm^2$	Raportul dintre fluxul luminos care părăseşte, atinge sau traversează o suprafaţă, propagîndu-se într-o direcţie dată în interiorul unui unghi solid şi produsul dintre unghiul solid respectiv şi proiecţia suprafeţei pe un plan perpendicular pe direcţia dată. cd/cm² este valoarea utilizată în principiu pentru corpuri luminoase (surse) cd/m² şi asb pentru suprafeţe iluminate sau transmiţătoare.

[1]) Relaţiile de definiţie sînt date în formă simplificată prin valori medii. Relaţiile de definiţie riguroase trebuie scrise sub formă diferenţială.

Tabelul 13.2. **Noţiuni de tehnica iluminatului**

Mărimea şi simbolul	Unitatea	Definiţia
Unghiul solid, ω	sterradian sr	Raportul dintre aria A decupată de un con pe o suprafaţă sferică (avînd centrul în vîrful conului) şi pătratul razei sferei r
Curba de distribuţie a intensităţii	cd	Reprezintă distribuţia intensităţii luminoase a unei lămpi sau corp de iluminat, în funcţie de unghiul de emisie, într-un plan dat. Această curbă este adeseori desenată cu valorile intensităţii luminoase reduse, corespunzător unui flux luminos total al sursei de 1000 lumeni
Unghiul de emisie, ε	grad	Pentru surse de lumină: unghiul format de direcţia de emisie şi direcţia definită ca origine. Pentru suprafeţe luminoase: unghiul dintre normala la suprafaţă şi direcţia considerată
Cantitatea de lumină, Q	lm · s	Produsul dintre fluxul luminos şi timpul cît este emis $Q = \Phi t$
Cantitatea de iluminare, H	lx · s	Produsul dintre iluminare şi timpul de expunere
Eficacitatea luminoasă, η	lm/W	Raportul dintre fluxul luminos emis şi puterea efectivă consumată de sursă
Randamentul corpului de iluminat, R_L	1	Raportul dintre fluxul luminos emis de un corp de iluminat la temperatura mediului ambiant (normal 25 °C) şi fluxul luminos total (optim) al lămpii (sau lămpilor) montate în corpul de iluminat
Factorul de utilizare, u	1	Raportul dintre fluxul luminos Φ_u primit de suprafaţa A şi fluxul luminos total Φ $u = \frac{\Phi_u}{\Phi}$
Indicele încăperii, i	1	Este folosit pentru a exprima influenţa geometriei încăperii asupra factorului de utilizare al încăperii. Se utilizează diferite formule, cea mai întrebuinţată în ţara noastră fiind: $i = \frac{0{,}2\ L_1 + 0{,}8\ L_2}{h}$ în care: L_1 — lungimea încăperii; L_2 — lăţimea încăperii; h — înălţimea sursei de iluminat deasupra suprafeţei de utilizare, în cazul iluminatului direct, semidirect şi mixt, sau înălţimea tavanului faţă de suprafaţa de utilizare în cazul iluminatului semiindirect şi indirect.

Tabelul 13.2 (continuare)

Mărimea şi simbolul	Unitatea	Definiţia
Suprafaţa de utilizare		În cazul iluminatului interior este în general planul orizontal situat la 0,85 m deasupra duşumelei. În cazul iluminatului exterior este suprafaţa orizontală de la nivelul drumurilor sau cel mult la o înălţime de 20 cm deasupra lor
Factorul de reflexie, ρ	1	Raportul dintre fluxul luminos reflectat de către corp şi fluxul luminos ce cade asupra lui. Aplicabil la reflexii regulate sau difuze
Factorul de transmisie, τ	1	Raportul dintre fluxul luminos transmis de către un corp şi fluxul luminos ce cade asupra lui. Aplicabil la transmisii regulate sau difuze.
Factorul de absorbţie, α	1	Raportul dintre fluxul luminos absorbit de către un corp şi fluxul luminos ce cade asupra lui
Putere de dispersie, σ	1	Raportul dintre media aritmetică a luminanţelor corespunzătoare unghiurilor de emisie de 20° şi 70° şi luminanţa corespunzătoare unghiului de emisie de 5°, în cazul incidenţei normale a luminii $\sigma = \frac{L_{20^\circ} + L_{70^\circ}}{2L_{5^\circ}}$
Factorul de uniformitate, g	1	Raportul dintre iluminarea minimă şi iluminarea medie — respectiv maximă — a unei suprafeţe: $g_1 = E_{min}/E_{med}$; $g_2 = E_{min}/E_{max}$ În mod similar se defineşte şi uniformitatea luminanţei.
Factorul luminii naturale, T	1	Raportul dintre luminarea E_p în punctul de măsurare şi iluminarea orizontală în atmosferă liberă E_a cu orizont liber $T = \frac{E_p}{E_a} \cdot 100$ (în %)
Temperatura de culoare, T_c	K	Temperatura corpului negru (radiator integral) la care acesta are aceeaşi cromaticitate cu a corpului radiant supus cercetării
Durata medie de exploatare	h	Perioada economică de funcţionare a surselor luminoase în concordanţă cu specificaţiile producătorului, adeseori dependente de frecvenţa de comutaţie, temperatura ambiantă şi variaţiile de tensiune

Tabelul 13.3. Lămpi electrice cu incandescenţă pentru utilizări generale

Puterea nominală W	Diametrul maxim mm	Lungimea maximă mm	Felul sticlei balonului mm	Fluxul luminos, lm 120 V	220 V	230 V	Felul soclului
15	61	112	clar mat	120 115	105 100,5	104 100	E 27/27 sau B 22 d/25 × 26
25	61	112	clar mat	217 208	190 184	187,5 180	
40	61	112	clar mat	372 348	312 299	308 295	
60	66	117	clar solar mat	623 349 598	517 290 495	505 282 485	
75	71	117	clar solar mat	840 470 806	690 306 662	690 386 662	
100	76	130	clar solar mat	1210 677 1060	1040 583 1000	1020 564 980	
150	81	150	clar	2020	1770	1740	
200	91	160	clar	2880	2540	2440	
300	111,5	240	clar	4680	4270	4200	E 40/45
500	131,5	275	clar	8000	7350	7300	
1000	151,5	309	clar	17 700	16 700	16 400	E 40/65 × 50

Tabelul 13.4. Lămpi fluorescente (cu starter)

Tipul lămpii	Puterea nominală W	Curentul nominal A	Diametrul maxim mm	Lungimea maximă [1]) mm	Fluxul luminos nominal, lm pentru culoarea: 1 X Alb lumina zilei corectat	2 Alb	Alb de lux	3 Alb cald	3 X Alb cald de lux	Observaţii
LFA 14 LFA 20 LFA 40 LFA 65	14 20 40 65	0,39 0,39 0,44 0,70	40,5 40,5 40,5 40,5	363,2 589,8 1199,4 1500,0	430 820 2120 3300	580 1080 2800 4400	360 700 1750 2800	590 1080 2800 4400	390 750 1880 3000	Montaj cu starter
LFB 40	40	0,44	40,5	1199,4	2000	2650	1680	2650	1780	Montaj cu starter, aprindere la temperaturi scăzute
LFR 40	40	0,44	40,5	1199,4	2000	2650	1680	2650	1780	Montaj fără starter, aprindere la temperaturi scăzute

[1]) Se referă la distanţa dintre suprafeţele externe ale soclurilor.

Tabelul 13.5. **Accesorii necesare (balasturi şi startere) pentru lămpi fluorescente**

Tipul lămpii	Starterul	Balastul	Nr. de lămpi alimentate	Tensiunea reţelei, V
LFA 14	SLB 20	BTA 14 BTB 14 BTA 30	1 1 2	220 120 220
LFA 20	SLB 20	BTA 20 BIB 20 BIA 40	1 1 2	220 120 220
LFA 40	SLA 40	BTA 40	1	220
LFB 40	SLA 40	BTA 40	1	220
LFR 40	Fără	BRA 40 BRB 40	1 1	220 220
LFA 65	SLA 65	BTA 65	1	220

Tabelul 13.6. **Lămpi cu mercur**

Tipul	Diametrul maxim mm	Lungimea maximă mm	Curent de lucru A	Consum de putere cu balast W	Flux luminos lm	Soclu
LVF 80	70	156	0,80	89	3000	E 27
LVF 125	75	177	1,15	136	5400	E 27
LVF 250	90	227	2,05	267	11 500	E 40
LVF 400	120	290	3,15	425	20 000	E 40

Tabelul 13.7. **Lămpi cu lumină mixtă, cu material fluorescent**

Tipul	Diametrul mm	Lungimea mm	Tensiunea nominală V	Consum de putere W	Flux luminos lm	Soclu	Luminanţă (aproximativ) sb
HWL 160 W/225 V HWL 160 W/235 V	87	187	225 235	160	2900	E 27	8
HWL 250 W/225 V HWL 250 W/235 V	106	230	225 235	250	5200	E 40	10
HWL 500 W/225 V HWL 500 W/235 V	130	275	225 235	500	12 500	E 40	12
HWL 1 000 W/225 V HWL 1 000 W/235 V	160	315	225 235	1000	28 000	E 40	15

Tabelul 13.8. **Lămpi cu vapori de sodiu**

Tipul	Diametrul exterior mm	Lungimea totală mm	Tensiunea de lucru c.a V	Curent de lucru (necomp) A	Consum de putere cu trafo W	Flux luminos lm	Randament luminos cu trafo lm/W	Luminanţa (aproximativ) sb
Cu înveliş termoizolant, soclu B 22 d								
Na 45 W-1	50	257	220/470	1,45/0,6	66	3700	52	11
Na 60 W-1	50	310	220/470	1,4/0,6	81	5000	62	11
Na 85 W-1	50	424	220/470	1,4/0,6	106	8400	79	11
Na 140 W-1	60	525	220/470	2,1/0,9	163	14 000	86	12
Na 200 W	60	775	220/660	3,1/0,9	240	23 000	96	13
Cu peliculă reflectoare de radiaţii infraroşii, soclu B 22d								
Na 40 W-2	51	310	220/490	1,4/0,6	61	4400	72	10
Na 60 W-2	51	425	220/490	1,4/0,6	81	7400	91	10
Na 100 W-2	64,5	528	220/490	2,1/0,9	123	12 500	102	10
Na 150 W-2	64,5	775	220/660	3,1/0,9	190	20 500	108	10
Na 200 W-2	64,5	1120	220/660	3,1/0,9	240	30 000	125	10
În formă tubulară, soclu G 13, starter: St 181 pentru Na/T 200 W−3, St 291 pentru Na 220 W								
Na/T 200 W-3	45	1200	220	2,3	235 [1])	31 000	124 [2])	7,5
Na 220 W	45	1200	380	1,5	245 [1])	26 000	106 [2])	14

[1]) Consum de putere cu balast.
[2]) Randamentul luminos cu balast.

Tabelul 13.9. **Nivele medii de iluminare recomandate pentru diferite categorii de străzi**

Clasificarea străzilor	Nivelul de iluminare necesar	Modul de aşezare a surselor *)		Iluminarea medie recomandată (lx), învelişul **) străzii fiind de culoare		Coeficienţii de uniformitate	
		bh	*bh*	deschisă	închisă	$\frac{E_{min}}{E_{med}}$	$\frac{E_{min}}{E_{max}}$
Străzile centrale (principale) în oraşe din grupa ***) I sau străzile cu trafic intens (peste 1000 vehicule pe oră şi sens) sau pieţe importante	Intens	Pe ambele părţi în zig-zag sau faţă în faţă (dacă artera este foarte largă)	Pe ambele părţi în zig-zag	10	20	1 : 2,5	1 : 5

Tabelul 13.9 (continuare)

Clasificarea străzilor	Nivelul de iluminare necesar	Modul de aşezare a surselor*)		Iluminarea medie recomandată (lx), învelişul **) străzii fiind de culoare		Coeficienţii de uniformitate	
		bh	*bh*	deschisă	închisă	$\frac{E_{min}}{E_{med}}$	$\frac{E_{min}}{E_{max}}$
Străzile centrale (principale) din oraşele din grupa II, şi străzile situate în zonele de clădiri cu mai multe etaje, cu un număr mare de instituţii, magazine, în oraşele din grupele I şi II, cum şi străzile cu circulaţie importantă (circa 500 vehicule pe oră şi sens)	Ridicat	Idem	Pe ambele părţi în zig-zag sau pe o singură parte	7	12	1 : 3	1 : 6
Străzile centrale (principale) din oraşele din grupa III, cum şi străzile în zonele cu construcţii mixte în care predomină cele cu mai multe etaje, în oraşele din grupele I şi II, ca şi străzile cu circulaţie medie.	Mediu	Pe ambele părţi în zig-zag	Pe ambele părţi în zig-zag sau pe o singură parte	5	10	1 : 3	1 : 6
Străzile comerciale fără circulaţie mare de vehicule, însă cu circulaţie intensă de pietoni	Mediu	Pe ambele părţi în zig-zag, sau faţă în faţă (dacă artera este foarte largă)	Idem	4	8	1 : 3	1 : 6
Străzile cu trafic mic	Mic	Pe ambele părţi în zig-zag sau faţă în faţă	Pe o singură parte	3	6	1 : 3	1 : 6

*) *b* — lăţimea străzii;
h — înălţimea de suspendare.

**) Înveliş de culoare deschisă: ciment-beton, piatră de granit, bitum (avînd $\rho > 0,15$);
Înveliş de culoare închisă: asfalt, asfalt negru (avînd $\rho < 0,15$).

***) Împărţirea în grupe a localităţilor:

Grupa I: Municipiul Bucureşti şi celelalte municipii ale ţării.

Grupa II: Capitalele de judeţ, oraşele cu o populaţie de peste 25 000 locuitori, staţiunile turistice şi balneo-climaterice importante.

Grupa III: Restul oraşelor şi comunelor ţării.

Tabelul 13.10. Valorile minime admisibile ale iluminărilor medii pentru clădirile industriale (conform STAS 6646-64)

Categoria de muncă	Contrastul între detaliu şi fond	Gradul de luminozitate al suprafeţei detaliului sau al fondului pe care se distinge detaliul	Valoarea minimă admisibilă a iluminării medii, lx			
			Lămpi fluorescente de joasă şi înaltă presiune		Lămpi incandescente	
			Iluminat combinat sau localizat	Numai iluminat general	Iluminat combinat sau localizat	Numai iluminat general
I. Lucru de precizie deosebită (detalii sub 0,1 mm)	a mic	întunecat	3000	750	1500	300
	b mic / mediu	luminos / întunecat	2000	750	1000	300
	c mediu / mare	luminos / întunecat	1500	560	750	300
	d mare	luminos	750	300	400	150
II. Lucru de mare precizie (detalii între 0,1 şi 0,3 mm)	a mic	întunecat	2000	750	1000	300
	b mic / mediu	luminos / întunecat	1000	4000	500	1150
	c mediu / mare	luminos / întunecat	750	200	400	100
	d mare	luminos	500	200	300	75
III. Lucru de precizie (detalii între 0,3 şi 1 mm)	a mic	întunecat	1000	300	500	150
	b mic / mediu	luminos / întunecat	750	200	400	100
	c mediu / mare	luminos / întunecat	500	200	300	75
	d mare	luminos	400	200	200	50
IV. Lucru de precizie mică (detalii între 1 şi 10 mm)	a mic	întunecat	—	150	150	50
	b mic / mediu	luminos / întunecat	—	150	150	50
	c mediu / mare	luminos / întunecat	—	150	100	50
	d mare	luminos	—	150	100	50

Tabelul 13.10 (continuare)

Categoria de muncă	Contrastul între detaliu și fond	Gradul de luminozitate al suprafeței detaliului sau al fondului pe care se distinge detaliul	Valoarea minimă admisibilă a iluminării medii, lx — Lămpi fluorescente de joasă și de înaltă presiune: Iluminat combinat sau localizat	Lămpi fluorescente de joasă și de înaltă presiune: Numai iluminat general	Lămpi incandescente: Iluminat combinat sau localizat	Lămpi incandescente: Numai iluminat general
V. Lucru brut (detalii peste 10 mm)	Indiferent de factorul de reflexie al fondului și de contrastul dintre obiect și fond	—	—	150	100	50
VI. Lucrări care necesită supravegherea generală a procesului de producție		—	—	75	—	20

Observații: Valorile din tabelul 13.10 sînt valabile indiferent de poziția planului util (orizontal, vertical sau înclinat). Dacă nu se face nici o precizare specială asupra planului de lucru, sau dacă locul de lucru are o poziție mobilă, iluminările date în tabel se consideră valabile pentru întregul plan, situat după cum urmează:

— la 0,85–1,00 m înălțime de la nivelul pardoselii pentru încăperile de producție;

— la nivelul pardoselii, pentru coridoare, scări, pasaje, căi interioare de transport, garaje, depozite de mărfuri cu bucata etc., cum și în încăperile în care se efectuează lucrul la sol.

— La valorile indicate pentru iluminatul combinat se includ și iluminările date de iluminatul general.

— Prin dimensiunile detaliilor se înțeleg mărimile anumitor părți ale obiectului privit și care trebuie distinse.

— Gradul de luminozitate al suprafeței detaliului sau al fondului se consideră:

— întunecat, pentru un factor de reflexie de maximum 0,3;

— luminos, pentru un factor de reflexie de minimum 0,3.

— Contrastul dintre detalii și fond se consideră:

— mic, pentru valori sub 0,2 (nuanțele culorilor detaliului și fondului se disting slab una de alta);

— mediu, pentru valori între 0,2 și 0,5 (nuanțele culorilor detaliului și ale fondului se disting bine una de alta);

— mare, pentru valori peste 0,5 (nuanțele culorilor detaliului și ale fondului se disting foarte bine una de alta).

Valorile date corespund situațiilor medii de exploatare a echipamentului pentru iluminat. În cazul iluminatului în serviciu trebuie să se aibă în vedere coeficienții de depreciere ai instalațiilor. Dacă valoarea oarecare a iluminării scade la 80% față de cifrele indicate în tabele, datorită uzurii sau murdăririi, echipamentul trebuie să fie revizuit.

În cazul iluminatului bancurilor de lucru, iluminatul general trebuie suplimentat. În cazul iluminatului general gradul de uniformitate $g_2 = E_{min}/E_{med}$ în zonele de lucru, din aceleași motive, nu trebuie să scadă sub valoarea 0,5 (1:2). La locul de lucru, luminanța maximă de 0,4 sb trebuie să fie satisfăcută într-o zonă de 0° – 30° deasupra orizontalei, iar în săli de clasă într-o zonă de 0° – 45° deasupra orizontalei. În proiectarea instalațiilor de iluminat trebuie acordată de asemenea atenție efectului de umbrire și incidenței luminii, uniformității iluminatului în timp, atenuării strălucirii (neincluzînd și strălucirea din reflexie) și culorii potrivite a luminii.

Tabelul 13.11. **Iluminări recomandate pentru iluminatul interior**

Instalații de iluminat pentru:	Tipul localului și al muncii	Iluminarea medie E_{med} lx — incandescent	fluorescent
Școli	— Săli de clasă, săli de muzică, licee, laboratoare chimice și fizice, studiouri, săli pentru lucru manual	150–200 150 200	300–400 300 400
Magazine	— Cu mărfuri colorate luminos, cu mărfuri de culori închise din depozite	100 200	200 1000
Locuințe, camere de zi	— Încăperi de zi, dormitoare, camere de hotel, baruri	50	—
	— Bucătării, săli de baie	150	250
	— Săli pentru desen, scris și studiu	200	400
Locuri de muncă [1]	— Forje, laminoare, fabrici de cherestea, săli de electroliză, depozite de marfă, garaje	cat. III	
	— Procese tehnologice de fasonare, turnare, prelucrare a lemnului, vopsire, prelucrări în industria alimentară	cat. III	
	— Montaj de precizie, filaturi, țesătorii, tipografii, birouri	cat. I	
	— Tehnică de mare precizie, optică, vopsitorii, țesătorii, croitorii, desen tehnic	cat. II	
	— Gravură, observații microscopice, operații chirurgicale	cat. I–III	

[1]) Categoriile de iluminare corespund cu cele definite în tabelul 13.10. Se vor alege nivelele de iluminare conform indicațiilor din acest tabel, corespunzător categoriei indicate.

Tabelul 13.12. **Factorul de reflexie ρ al diferitelor culori și materiale iluminate în lumină albă**

Aluminiu:		Granit	10...25%
— polizat și tratat prin procedeul de eloxare [1])	85%	Verde deschis	45...65%
— mat	55...60%	Roșu deschis	30...50%
— polizat mecanic	65...75%	Galben deschis	50...70%
— laminat	80%	Marmură albă	60...85%
Alamă:		Argint oglindă	88...93%
— mată	54%	Mortar:	
— polizată	60%	— închis	20...30%
Cărămidă	10...30%	— deschis	40...50%
Acetat de celuloză	10...40%	Bleumarin	5...10%
Crom polizat	60...70%	Nichel:	
Asfalt comprimat, suprafața gudronată	8...15%	— mat	50%
Beton	10...50%	— polizat	53...63%
Smîntînă	60...75%	Vopsea albă	87%
Maro închis, galben închis	10...20%	Pergament	20...50%
Gri închis	10...15%	Trandafiriu	45...55%
Roșu închis	10...20%	Oglindă de sticlă argintată	85...90%
Email alb	75...87%	Albastru deschis	35...45%
Sticlă:		Oțel	55%
— curată	6...8%	Cenușiu	45...50%
— jivrată	5...15%	Staniu polizat	70%
— opal	20...70%	Alb	70...90%
		Maro-gălbui	30...50%
		Zinc polizat	55%

[1]) Gradul de puritate 99,99%.

Tabelul 13.13. **Factorul de utilizare al încăperii *u* (pentru lămpi cu incandescenţă)**

Elementul camerei	Indicele încăperii [1] i	Tipul de iluminat: Direct	Semidirect	Mixt	Semiindirect	Indirect
Plafon luminos	1	0,17	0,15	0,15	0,09	0,09
(ρ = 0,8)	1,2	0,20	0,18	0,18	0,12	0,11
Pereţi cu iluminare medie	1,5	0,24	0,22	0,23	0,15	0,14
(ρ = 0,5)	2	0,30	0,27	0,27	0,18	0,17
Duşumea cu iluminare medie	4	0,42	0,39	0,38	0,26	0,25
(ρ = 0,3)	6	0,48	0,44	0,43	0,29	0,29
Plafon cu iluminare medie	1	0,15	0,13	0,11	0,06	0,06
(ρ = 0,5)	1,2	0,17	0,15	0,14	0,08	0,07
Pereţi întunecoşi	1,5	0,21	0,18	0,17	0,10	0,09
(ρ = 0,3)	2	0,27	0,23	0,22	0,13	0,11
Podea întunecoasă	4	0,40	0,35	0,32	0,17	0,17
(ρ = 0,1)	6	0,46	0,40	0,37	0,22	0,19

[1] Indicele încăperii poate fi calculat din tabelul 13.2.

Tabelul 13.14. **Randamentul de exploatare a corpurilor de iluminat** R_L

Tipul distribuţiei luminii	şi corpul de iluminat	Randament de exploatare
Direct	– tip reflector	0,65...0,80
	– tip încastrat cu abajur	0,50...0,65
	– tip încastrat cu sticlă sintetică albă	0,45...0,60
Semidirect	– corp cu sticlă sintetică albă	0,50...0,65
	– corp cu sticlă sintetică transparentă	0,60...0,85
	– corp în tavan cu abajur sau grătare	0,55...0,75
Difuz	– corp cu radiant liber	0,78...0,92
	– corp cu abajur suspendat	0,65...0,85
Semiindirect		0,60...0,80

Tabelul 13.15. **Formule pentru calculul iluminării**

Iluminarea orizontală într-un punct de la o sursă luminoasă punctiformă	$E_h = \frac{I_\varepsilon}{r^2}\cos i = \frac{I_\varepsilon}{h^2}\cos^3 i$	E_h – iluminarea orizontală (în lx) la punctul considerat I_ε – intensitatea luminoasă în direcţia ε (direcţia către punctul considerat) (în cd) r – distanţa de la sursa de lumină la punctul considerat (în m) i – unghiul de incidenţă faţă de verticală h – înălţimea sursei de lumină deasupra planului în care se află punctul considerat (în m)
Iluminatul încăperii	$E_{h\,med} = \frac{uN\Phi_L}{A}$ $N = \frac{\Phi_L}{\Phi_T}$	$E_{h\,med}$ – iluminarea medie orizontală (în lx) Φ_L – fluxul luminos al unei lămpi (în lm) Φ_T – fluxul total necesar a fi instalat în încăpere (în lm) N – numărul de lămpi A – suprafaţa necesară a fi luminată (în m²) u – factorul de utilizare a încăperii.

Tabelul 13.16. **Exemplu pentru iluminatul birourilor**

Tipul încăperii	Birou, tavan de culoare deschisă, pereţi cu factor de reflexie mediu
Tipul de muncă	Muncă de birou, desen
Nivelul de iluminare cerut	Ridicat, conform tabelului 13.11
Iluminare medie necesară $E_{h\,med}$	500 lx
Cele mai indicate tipuri de iluminat	Iluminat general cu lămpi fluorescente, corpuri pentru tavan, cu capace de sticlă sintetică, distribuţia luminii fiind semidirectă. Randamentul corpurilor de iluminat, conform tabelului 13.14, este $R_L = 0{,}60$
Dimensiunile încăperii	Lăţime $L_2 = 6$ m; lungime $L_1 = 10$ m; înălţime $H = 3{,}2$ **m.** Înălţimea corpului de iluminat deasupra planului de lucru $h = 2{,}35$ m.
Factorul de utilizare al încăperii	$u_i = 0{,}3$, conform tabelului **13.13** pentru indicele de **încăpere** $i = \frac{0{,}2 \times 10 + 0{,}8 \times 6}{2{,}35} = 2{,}9$
Factorul de utilizare	$u = u_i \cdot R_L = 0{,}3 \cdot 0{,}60 = 0{,}18$

Se aleg lămpi LFA 65/2 avînd fiecare cîte 4400 lm.
Numărul de lămpi $n = 38$.

În vederea obţinerii unei valori medii de exploatare pentru iluminarea de E_{med} = = 500 lx în zona biroului, sînt necesare 38 lămpi fluorescente LFA 65/2. Pentru a traduce aceasta în termeni practici se vor alege două benzi de iluminat, fiecare constînd din zece perechi de corpuri de iluminat şi acoperind întreaga lungime a încăperii. Iluminarea medie ce se poate obţine astfel pe această cale este de aproximativ 518 lx:

$$E_{h\ med} = \frac{0,18 \times 38 \times 4\,400}{60} = 500 \text{ lx.}$$

13.2. TEHNICA VENTILAŢIEI INDUSTRIALE

13.2.1. Instalaţia de ventilaţie

Rolul instalaţiei de ventilaţie este de a reînnoi aerul din încăperi. Adesea aceasta implică şi îndepărtarea prafului cu ajutorul filtrelor de aer şi încălzirea aerului cu ajutorul bateriilor de încălzire.

Ventilaţia prin depresiune împiedică pătrunderea gazelor, vaporilor, mirosurilor, prafului etc. în încăperile învecinate. Dacă aerul este doar uşor absorbit din încăpere, atunci aerul proaspăt pătrunde prin crăpăturile sau golurile din ferestre şi uşi. Dacă acest lucru este insuficient (în cazul unui nivel înalt de vacuum) trebuie să fie prevăzute deschideri pentru pătrunderea aerului de exemplu din încăperile învecinate cu aer proaspăt (curat) din exterior prin fante practicate în luminatoare; acestea trebuie să fie amplasate astfel încît curentul de aer iniţial să fie îndreptat în sus, către tavan.

Sistemul de echilibru se obţine prin prevederea unei ventilaţii de intrare şi ieşire. Depresiunea se obţine şi dacă debitul de aer evacuat este mai mare decît cel care intră.

Ventilaţia prin suprapresiune se prevede pentru protecţia împotriva gazelor din exterior, a prafului, mirosurilor etc. Acest tip de ventilaţie este potrivit pentru împiedicarea pătrunderii prafului în camere de comandă, laboratoare sau ateliere, de exemplu în fabrici de instrumente de precizie.

Aerul filtrat este insuflat în încăperi de unde se scurge prin goluri şi crăpături. Dacă aceasta este insuficient, trebuie prevăzută o ventilaţie de evacuare.

Cînd se utilizează ventilatoare de introducere şi de evacuare a aerului, suprapresiunea se obţine dacă ventilatoarele de intrare au un debit mai mare.

La un punct de intrare a aerului (guri de introducere sau refulare) este dificil în general să se întrerupă jetul de aer format, ceea ce duce la apariţia curenţilor de aer. Din acest motiv, în cele mai multe cazuri, este necesar un echipament de distribuţie a aerului. O soluţie ideală este tavanul fals, perforat. De asemenea adesea este avantajos de a se insufla aerul printr-o sită direct sub nivelul tavanului sau vertical prin locaşul ferestrei de-a lungul pereţilor. Această metodă nu se recomandă pentru încăperile foarte înalte sau cele neocupate.

La un punct de evacuare a aerului (guri de evacuare), aerul curge din toate direcţiile în mod uniform spre orificiul de aspiraţie. Viteza curentului de aer este din această cauză mică şi creşte mai mult doar pe direcţia perpendiculară a gurii de evacuare. Punctele de acces şi de evacuare trebuie să fie astfel aranjate încît curenţii de aer să circule uniform prin toată încăperea şi să nu formeze colţuri moarte.

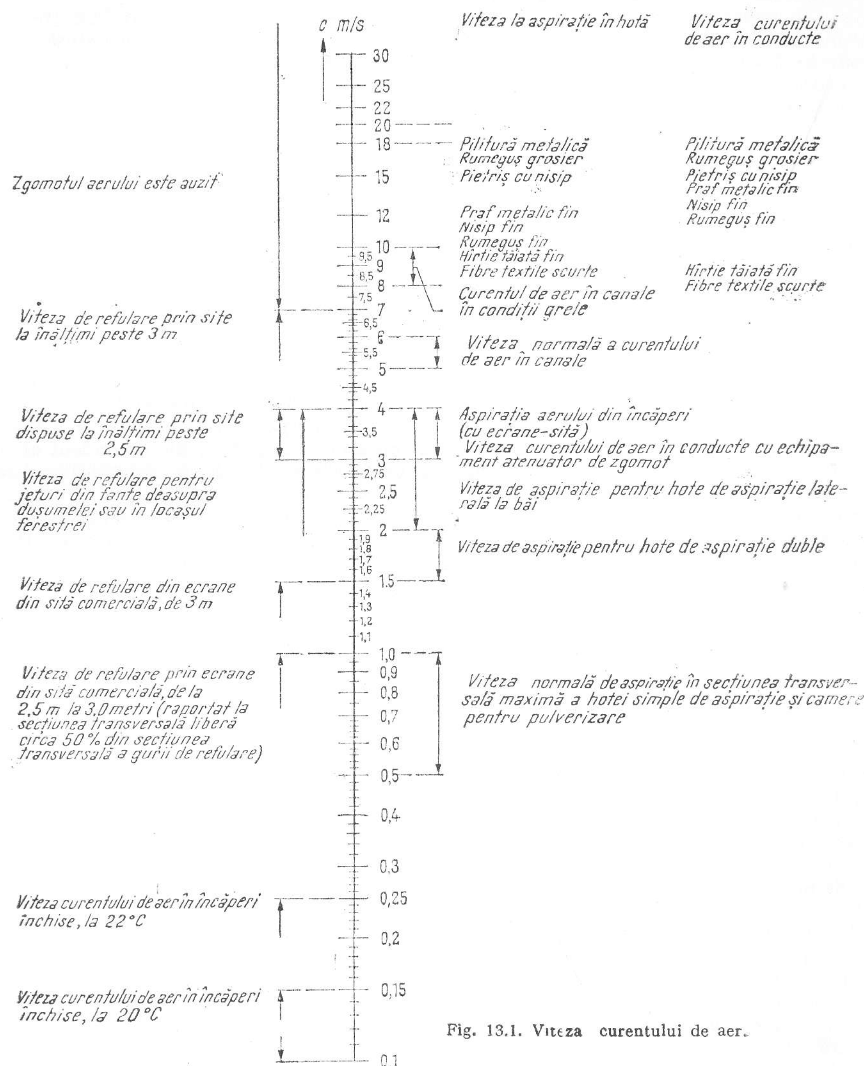


Fig. 13.1. Viteza curentului de aer.

Chiar dacă această condiţie nu este îndeplinită în totalitate, mişcarea aerului în zonele mai puţin accesibile ale încăperii se produce prin circulaţia naturală a aerului, datorită diferenţelor de temperatură.

În vederea înlăturării curenţilor de aer supărători în încăpere este important ca atunci cînd temperatura exterioară este scăzută cantitatea de aer introdusă să fie redusă. Aceasta se obţine prin montarea unor clapete de reglaj, prin reducerea turaţiei ventilatoarelor sau prin deconectarea cîtorva ventilatoare în cazul în care instalaţia cuprinde mai multe.

Dacă reducerea cantităţii de aer introdus se dovedeşte insuficientă sau nu este permisă, aerul introdus trebuie încălzit în vederea împiedicării apariţiei curenţilor de aer, sau formării ceţei în încăperile umede. Umezeala se poate forma, de exemplu, în bucătării, vopsitorii, magazine, încăperi din uzine textile, industria laptelui şi a hîrtiei sau la instalaţii de galvanizare. În acest caz sînt necesare dispozitive de reglare automată a temperaturii.

În cazul ventilaţiei prin depresiune (numai cu ventilatoare de evacuare) se va avea în vedere că încălzirea încăperii trebuie corelată cu încălzirea aerului ce pătrunde în încăpere.

Pentru calculul căldurii necesare pentru încălzirea aerului, v fig. 13.2.

Este preferabilă evacuarea gazelor, a vaporilor sau prafului (chiar de la punctul lor de formare (de origine), astfel ca aerul din încăpere să fie cît mai puţin contaminat cu aceste elemente. Hota de aspiraţie, necesară acestui scop, trebuie să fie dispusă cît mai aproape de punctul de formare a prafului sau vaporilor. Trebuie să se ţină seama de orice mişcare a acestora din urmă, de exemplu de curentul termic ascendent al vaporilor sau de zborul centrifugal tangenţial al prafului provenit de la pietrele de polizor. Hotele trebuie să fie cît mai mici posibil, dar în număr suficient pentru a îndeplini condiţiile impuse. Pentru suprafeţe mai întinse dar cu conţinut mai scăzut de vapori sau praf, se pot monta două hote de aspiraţie de mărimi diferite, una într-alta (hotă dublă). Rămîne astfel deschisă doar o margine îngustă şi o mică secţiune centrală. Vitezele curenţilor de aer în secţiunile transversale de admisie şi în conducte sînt date în figura 13.1.

Instalaţii de încălzire a aerului

Instalaţia de încălzire a aerului este în general legată de sistemul de ventilare.

Încălzirea prin recirculaţie. Dacă ventilaţia încăperilor prin circulaţie naturală de aer este suficientă, se recomandă încălzirea prin recirculaţie. Aerul din încăpere este pur şi simplu forţat să treacă printr-un dispozitiv de încălzire. Aceasta se obţine fie cu ajutorul unor aeroterme, fie printr-o instalaţie centrală. În ultimul caz, încălzitoarele de aer şi ventilatoarele mai pot fi legate în serie cu filtre şi dispozitive anti-zgomot. De asemenea, se poate prevedea un dispozitiv central de comandă şi reglare. Problema zgomotului pentru ventilatoare dispare, iar costul instalaţiei este relativ scăzut. Acolo unde nu este necesar un calcul exact al încălzirii totale necesare sau în cazul unor încăperi mici se poate utiliza abaca din figura 13.2.

Folosind datele pentru tipul de încăperi[1]) (scara A_1) şi volumul încăperii (scara B), prin trasarea unei linii prin aceste două puncte se va citi pe scara C debitul caloric necesar Q în kcal/h, pentru $t_e = -15°C$ şi $t_i = +20°C$. Dacă diferenţa dintre temperatura exterioară şi cea interioară este mai mare de 35°C, valoarea găsită pe scara C poate fi corectată cu ajutorul scării E. Debitul caloric necesar poate fi atunci citit pe scara D.

[1]) Dacă necesarul pentru 1 m³ este cunoscut, se pot începe calculele pe scara A_2.

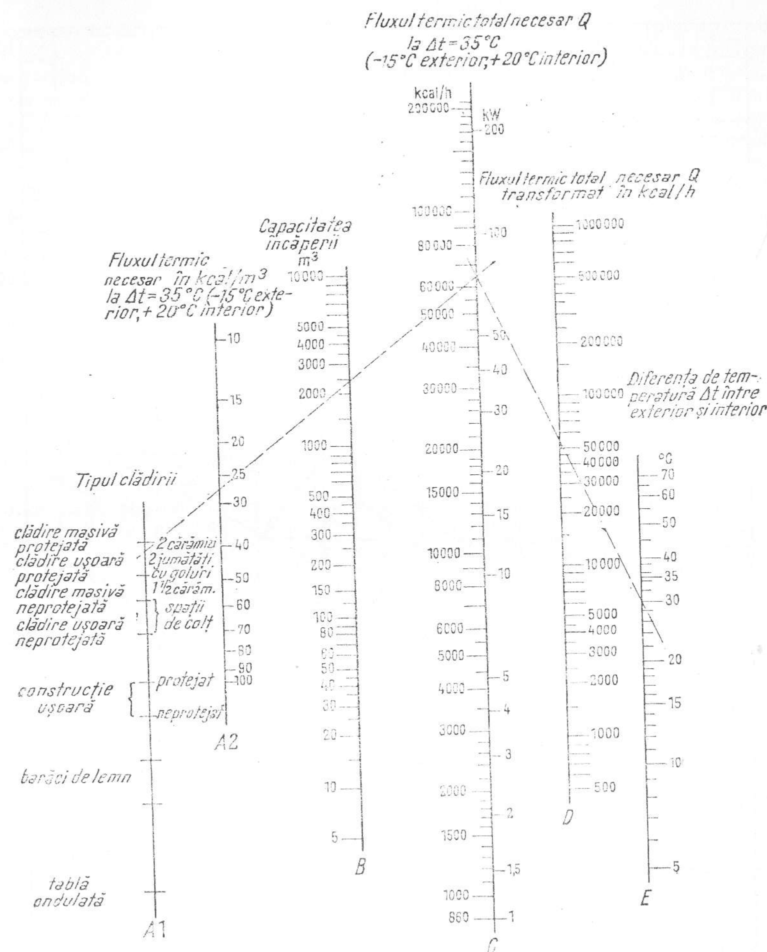


Fig. 13.2. Abacă pentru determinarea pierderilor de căldură a încăperilor.

Încălzirea mixtă a aerului. Acest tip de încălzire face posibilă combinarea ventilaţiei încăperii cu activarea circulaţiei naturale a aerului avînd ca urmare încălzirea rapidă şi uniformă a încăperii.

O parte din aerul viciat este evacuat din încăpere, fiind refulat în atmosferă şi o cantitate echivalentă de aer proaspăt este admisă înăuntru. În funcţie de necesităţi, această instalaţie poate fi proiectată pentru ventilaţie prin suprapresiune sau prin depresiune, printr-o dimensionare potrivită a ventilatoarelor de admisie sau de evacuare. Acest sistem se poate utiliza şi numai în scopuri de ventilare (de exemplu vara).

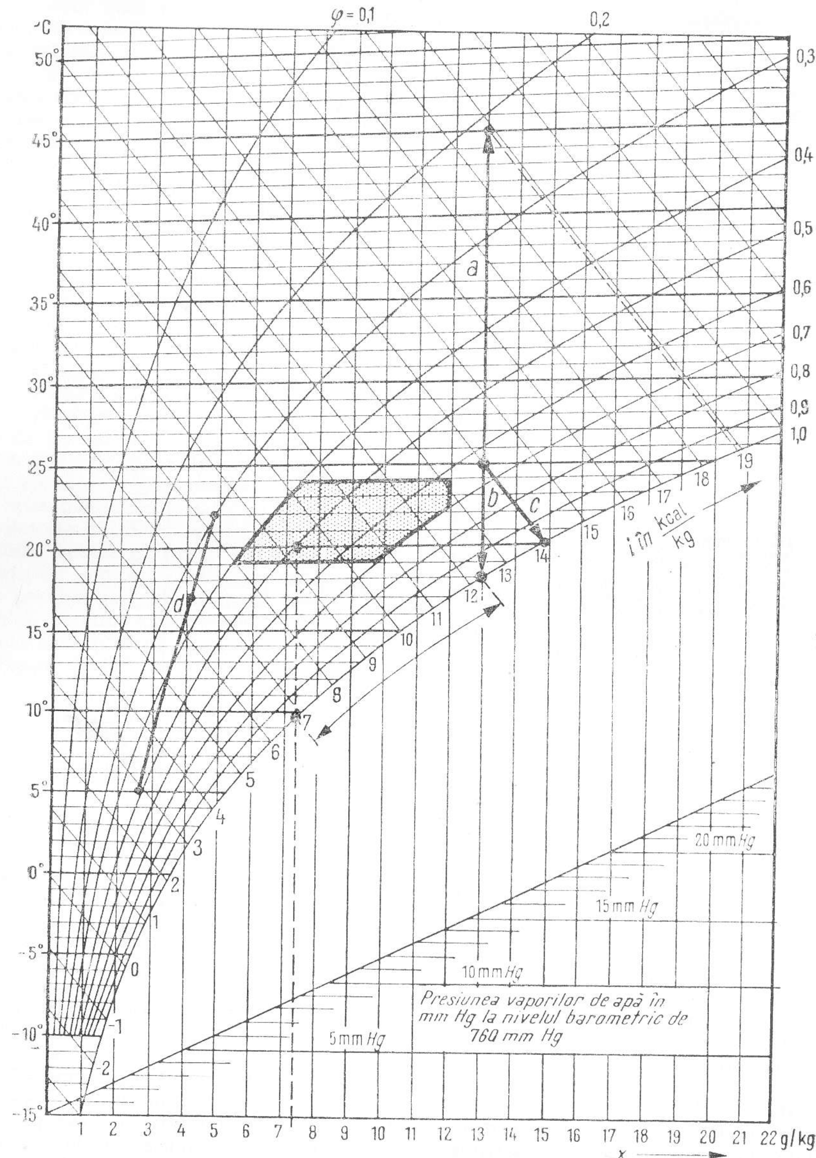


Fig. 13.3. Diagrama *i-x* pentru aer umed.

Instalaţii de condiţionare a aerului

Instalaţiile de condiţionare a aerului, pe lîngă funcţiunile de înlocuire a aerului şi încălzire a încăperii, au rolul de a menţine temperatura şi umiditatea din încăpere la o valoare precisă, indiferent de starea aerului din exterior. Pe lîngă echiparea cu filtre, ventilatoare, încălzitoare de aer şi dispozitive de atenuare a zgomotului, vor fi necesare şi răcitoare şi umidificatoare de aer, pentru răcirea şi schimbarea umidităţii aerului.

Tratamentul aerului admis, necesar în vederea obţinerii climatului prescris pentru încăpere, poate fi găsit în diagrama *i-x* (fig. 13.3). Această diagramă arată relaţia între temperatura aerului, umiditatea absolută şi relativă şi entalpia sa (la 760 mm Hg), în domeniul care ne interesează din punct de vedere al tehnologiei aerului condiţionat. Toate modificările parametrilor variabili ce apar în cazul încălzirii, răcirii şi umidificării aerului sînt conţinute în această diagramă.

Explicarea simbolurilor:

x — umiditatea absolută (grame de vapori de apă/kg aer uscat);

φ — umiditatea relativă, adică raportul dintre umiditatea aerului şi cea mai mare umiditate posibilă, la o temperatură anumită;

i — entalpia în kcal/kg aer uscat, amestecat cu x grame vapori de apă.

Încălzirea modifică starea aerului de-a lungul dreptei x = constant (săgeata „*a*"). Entalpia necesară poate fi citită cu ajutorul valorilor „*i*".

Prin răcire apare de asemenea, variaţia de stare de-a lungul dreptei x = constant (săgeata „*b*"), pînă ce este atinsă linia punctului de rouă ($\varphi = 1$) şi aici variaţia continuă de-a lungul liniei punctului de rouă înspre stînga, cu condensarea apei. Cantitatea de apă condensată poate fi citită pe scara x, iar cantitatea de căldură disipată — de-a lungul scării i.

În cazul umezirii aerului cu ajutorul apei fin pulverizate, variaţia de stare apare de-a lungul dreptei i = constant (săgeata „*c*"). Entalpia rămîne constantă, aşadar căldura de vaporizare este luată din atmosferă (din aer).

Punctul de stare pentru amestec de aer se găseşte pe dreapta ce uneşte punctele de stare pentru componentele amestecului. Acesta împarte dreapta ce uneşte cele două puncte, proporţional cu debitele amestecate.

O ultimă scară pe care se poate citi presiunea parţială a vaporilor de apă, în funcţie de valorile umidităţii absolute (valorile x) este inclusă de asemenea în partea de jos a diagramei.

13.2.2. Principii şi noţiuni de ventilaţie

Puterea cerută de un ventilator, în kW, este dată de relaţia

$$P_W = \frac{Vp_t}{\eta \cdot 102},$$

în care: V este debitul ventilatorului (cantitatea de aer), în m³/s;

$p_t = p + p_d$ este presiunea totală;

p — presiunea statică, în mm H_2O, care poate fi furnizată de ventilator;

p_d — presiunea dinamică, în mm H_2O (energia cinetică a aerului în mişcare) în secţiunea transversală de refulare a ventilatorului;

$$p_d = \frac{1}{2g}\gamma c^2;$$

γ — greutatea specifică a aerului, în kgf/m³:

c — viteza curentului de aer în secţiunea transversală de refulare a ventilatorului, în m/s;
g — acceleraţia gravitaţională, în m/s^2;
η — randamentul ventilatorului (fără pierderile motorului).

În scopul unor evaluări aproximative în starea standard (760 mm Hg, 15°C) se poate utiliza formula:

$$p_{d0} = \frac{c^2}{16}.$$

Mărimile referitoare la starea standard sînt marcate cu indicele „0". În cazul une situaţii diferite de starea standard se aplică următoarea expresie:

$$p = p_0 \frac{bT_0}{b_0T}$$

în care: p_0 — presiunea în starea standard, în mm H_2O;
p — presiunea în condiţiile date, în mm H_2O;
b — nivelul barometric, în mm Hg;
b_0 — nivelul barometric în starea standard, în mm Hg;
T — temperatura aerului, în K;
T_0 — temperatura aerului în starea standard, în K.

Tabelul 13.17. Parametrii recomandaţi ai aerului în diferite industrii

Industria	Operaţia	Temperatura °C	Umiditatea relativă %
Textilă	Bumbac:		
	— preparare	20...25	50...60
	— filare	20...25	60...70
	— ţesătorie	20...25	70...85
	Lînă:	20...25	65...70
	— preparare		
	— filare	20...25	60...80
	— ţesătorie	20...25	60...80
	Mătase artificială:		
	— filare	20...25	80...90
	— răsucire	20...25	70...80
	Mătase:		
	— filare	22...25	65...70
	— ţesătorie	22...25	60...70
Pielărie şi blănărie	Preparare, vopsire, depozitare	30 5	sub 40 25...30
Tutun	Ţigări de foi şi ţigarete:		
	— manufacturi	20...22	60...70
	— umidificare	22...24	92...93
	— depozitare	18...20	60...65
Hîrtie	Calandrare	pînă la 27	60...65
	Tăiere, făţuire	20...22	60...65
	Tipărire	20...22	60...65
	Depozitare	20...25	60 şi sub
Cărţi	Depozitare	18...20	40...60

Tabelul 13.17. (continuare)

Industria	Operaţia	Temperatura °C	Umiditatea relativă %
Fotografie	Developare	20...22	60
	Uscare	22...25	50
	Tăiere	22	65
Construcţii de instrumente optice			nu peste 35
Alimentară	Ciocolată:		
	— fabricare	17...18	30...50...60
	— împachetare	18	
	— depozitare	15	
Pictură	Pictură prin stropire	20...25	56...65
Măsurări: — încăperi cu aparate de măsurat, — încăperi pentru calibrare		20	50
Spitale	Săli de operaţii	20...25	55
Încăperi pentru depozitare	Cartofi	3... 7	cît se poate de ridicată
	Fructe şi legume	1... 4	85...95
	Produse lactate	0... 2	60...65
	Carne	−20...−10	

Prin introducerea unui difuzor după ventilator o parte din presiunea dinamică este transformată în presiune statică. Presiunea adiţională astfel obţinută reprezintă o îmbunătăţire în sistemul de ventilaţie, sau — acolo unde ventilatorul este echipat cu palete ajustabile — dă posibilitatea exploatării cu un unghi mai mic de atac al paletelor. Aceasta va permite reducerea considerabilă a necesarului de putere avînd ca urmare o reducere corespunzătoare a costului exploatării.

Creşterea presiunii statice în difuzor se poate calcula cu relaţia:

$$\Delta p = \eta_D \frac{\gamma}{2g}(c^2 - c_1^2),$$

în care: c_1 este viteza curentului de aer în secţiunea transversală de ieşire a difuzorului de diametru D_1, care este egală cu $4V/(\pi D_1^2)$;
η_D — randamentul difuzorului (în cazul unui difuzor cu o deschidere unghiulară de 15° şi cu suprafaţa interioară netedă, $\eta_D \approx 0{,}75$).

Legi de similitudine

Cunoscînd performanţele unui ventilator la o anumită turaţie (n_1) se pot calcula performanţele sale la alte turaţii (n_2), iar în cazul unor ventilatoare asemenea (similare geometric) şi la alte diametre ale rotorului cu ajutorul relaţiilor:

— debitul $$V_2 = V_1 \frac{D_2^3 n_2}{D_1^3 n_1};$$

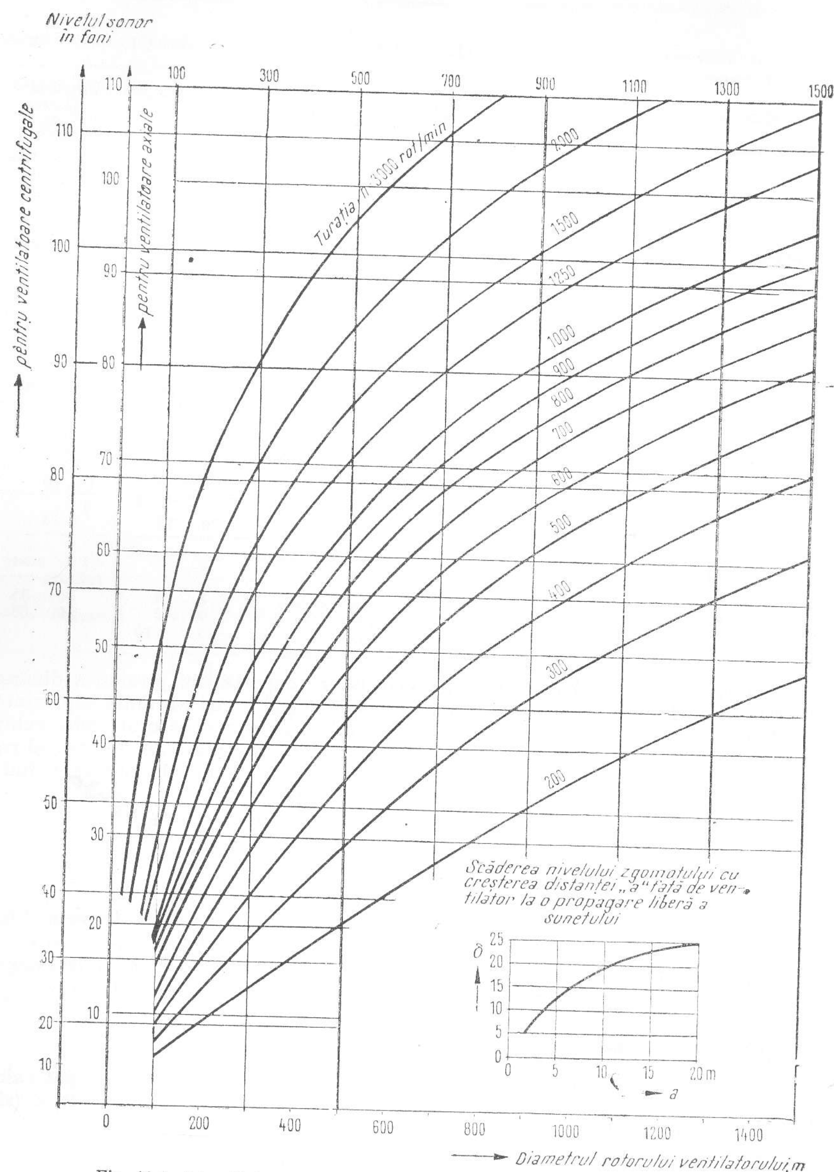


Fig. 13.4. Intensitatea sunetului, în foni, conform standardelor germane. Aceste valori se aplică pentru un curent continuu de aer la o distanță de 1 m, măsurate din centrul lamei în direcție axială, în cazul propagării libere a sunetului.

— presiunea (p_t, p, p_d):
$$p_2 = p_1 \left(\frac{D_2 n_2}{D_1 n_1}\right)^2;$$

— puterea necesară:
$$P_{w2} = p_{w1} \frac{D_2^5 n_2^3}{D_1^5 n_1^3}.$$

Diferențele principale între ventilatoarele axiale și cele radiale (ventilatoare centrifugale)

Ventilatoarele axiale absorb și evacuează aerul în direcția axială, furnizînd o mică cantitate de aer la presiune scăzută.

Ventilatoarele radiale absorb aerul axial și îl evacuează radial, furnizînd o mare cantitate de aer, la presiune înaltă.

Ambele diagrame, oricum, includ modele de joasă și înaltă presiune, de exemplu datele de performanțe limite suprapuse. De exemplu, parametrii realizați de ventilatoarele axiale de tip tubular sînt cuprinși în limitele celor realizați de ventilatoarele radiale de joasă presiune.

Zgomotul de exploatare al ventilatorului

O bună indicație asupra zgomotului produs de ventilatoare se poate obține prin figura 13.4 (după Lücke). Această prezentare, însă nu ține seama de diferitele tipuri de ventilatoare proiectate. De asemenea nu dă informații în legătură cu domeniul de frecvență a zgomotului produs, care este important pentru evaluarea valorii supărătoare. Informații mai precise pot fi obținute prin înregistrarea și analiza zgomotului.

13.2.3. Alegerea ventilatoarelor

Dimensiunile ventilatoarelor și puterea lor sînt determinate de debitul de aer necesar (cantitatea de aer livrată în unitatea de timp), de presiunea statică și nivelul admisibil de zgomot.

Determinarea debitului necesar de aer

Debitul de aer necesar se stabilește astfel ca acesta să fie suficient pentru evitarea vicierii aerului în încăpere peste o valoare maximă impusă, precum și pentru evitarea creșterii (sau scăderii) temperaturii și umidității în încăpere peste o anumită limită.

1) Vicierea aerului datorită prezenței gazelor, prafului, vaporilor etc.

Instalația de ventilație are drept scop limitarea vicierii aerului. Debitul de aer necesar se exprimă prin relația:

$$V = \frac{K}{k_i - k_0} \quad \text{m}^3/\text{h}$$

în care: K este debitul de noxe degajate în încăpere, în cm^3/h pentru materialele gazoase și în mg/h pentru pulberi;

k_i — concentrația de noxă maxim admisă în aerul din încăpere, în cm^3/m^3 sau mg/m^3;

k_0 — concentrația de noxă în aerul din exterior (aer proaspăt).

Se mai utilizează uneori notația MAC (*maximum working area concentration* — concentrația maximă a zonei de lucru) pentru k_i.

Tabelul 13.18. **Valori limită pentru vicierea aerului în încăperi de lucru**

Conținutul de CO_2 în aerul exterior, $k_0 \approx 0{,}05\% \approx 500$ cm³/m³ aer. Coloana a doua a tabelului dă limita maximă permisă a concentrației k_i în încăperile de lucru, coloana a treia — valorile care nu mai sînt neutre prin efectul lor după o lungă perioadă de expunere și coloana a patra — nivelul periculos (toxic) (în cazul unei inhalări pe o perioadă de 1/2...1 oră. Valorile marcate cu (S) conform cu Standard Association (1950) au fost alese fără definirea ulterioară de către GI Arbeitsblätter (Tabele de lucru), fascicula 19 (1952).

Substanța	k_i nivel permis	Limita inferioară a riscului	Nivel periculos
Gaze nocive, în cm³/m³ aer			
1. Acid cianhidric	20	40	100
2. Acid clorhidric gazos	10	50 [1]	1000
3. Acid nitrosulfuric	10	35	100
4. Amoniac	50 [1]	100	2500
5. Bioxid de carbon	1400	—	—
6. Bioxid de sulf	10 [1]	20 [2]	400
7. Clor	1	2 [1]	25
8. Fosgen	0,25	0,5	12
9. Hidrură arsenică	0,6	1,5	60
10. Hidrogen fosforat	0,7	2,5...3,0 [1]	400
11. Hidrogen seleniat	0,3...0,6 [1]	1,5	—
12. Hidrogen sulfurat	20 [1]	120	400
13. Oxid de carbon	100	160	1200...2000
14. Ozon (după Dr. Roedler)	0,05	0,18...0,47 [2]	0,6
Vapori solubili toxici, în cm³/m³ aer			
1. Acetonă	260	—	—
2. Alcool etilic	1000	2500	—
3. Alcool metilic	200	400	—
4. Anilină	20	25	—
5. Benzen	50	500	—
6. Bisulfură de carbon	20	100	—
7. Cloroform	280	600	—
8. Clorură de etil	200	400	—
9. Clorură de metil	100	500	—
10. Clorură de metilen	500	800	—
11. Eter etilic	150	1800	—
12 Petrol	750 (100 S)	—	—
13 Tetracloretan	1,5	4	—
14. Tetraclorură de carbon	50	peste 1000	—
15. Toluen	200 (S)	—	—
16. Tricloretilenă	150	200	—
17. Xilenă	200 (S)	—	—

[1]) Sesizabile prin miros.
[2]) Iritante ale căilor respiratorii.

Tabelul 13.18 **(continuare).**

Substanța	k_i nivel permis	Domeniul periculos [1])
Vapori metalici toxici și prafuri, în mg/m³ aer		
1. Arsenic și compușii	1...2 (0,15 S)	peste 5
2. Berilium și compușii	—	peste 0,1
3. Cadmiu și compușii	0,1	peste 0,5
4. Crom și compușii	0,1	peste 0,5
5. Mangan și compușii	6,0	de la 50
6. Mercur	0,1	de la 1,0
7. Pentoxid de fosfor	1,0	—
8. Plumb și compușii	0,15	de la 0,5
9. Seleniu	0,8	peste 1,0

[1]) Periculos (toxic) în cazul unei expuneri de lungă durată.

2) Creșterea temperaturii încăperii, datorită aportului de căldură al utilajelor și al echipamentului electric.

Instalația de ventilare are drept scop reducerea creșterii de temperatură peste o valoare admisibilă. Debitul de aer necesar va fi:

$$V = \frac{I_1 \pm I_2}{c_p(t_i - t_0)} \text{ m}^3/\text{h}$$

unde: I_1 este debitul caloric (aportul de căldură) disipat în încăpere, în kcal/h;
I_2 — pierderile de căldură ale încăperii în cazul unor temperaturi exterioare mai mici ca ale încăperii (semnul minus) sau debitul caloric pătruns datorită radiației solare (semnul plus,) în kcal/h;
c_p — căldura specifică a aerului ($c_p = 0{,}31$ kcal/m³ grd);
t_i — temperatura maxim admisă pentru încăpere, în °C;
t_0 — temperatura aerului la intrare (temperatura exterioară), în °C;

În cazul motoarelor electrice și al transformatoarelor, cantitatea de căldură I_1 poate fi calculată cu o precizie suficientă, din puterea nominală P (în kW) și randamentul η. În acest caz cantitatea de aer necesară este (1 kW = 860 kcal/h):

$$V = \frac{P\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)}{c_p(t_i - t_0)} 860 \text{ m}^3/\text{h},$$

unde I_2 nu s-a luat în considerare.

Pentru scopuri estimative:

La o diferență de temperatură $t_i - t_0 = 10$°C și la o putere pierdută prin disipație de 1 kW, cantitatea necesară de aer va fi:

$$V = 300 \text{ m}^3/\text{h}.$$

3) Creşterea umidităţii încăperii datorită producerii de vapori din băi deschise (evaporarea pe suprafeţe libere).

Instalaţia de ventilaţie are drept scop ca, prin introducerea de aer încălzit, să absoarbă cantitatea de vapori de apă şi să-i evacueze în atmosfera exterioară. Înainte de toate este necesar să se determine cantitatea de vapori de apă din atmosfera încăperii (v. fig. 13.3 şi 13.5).

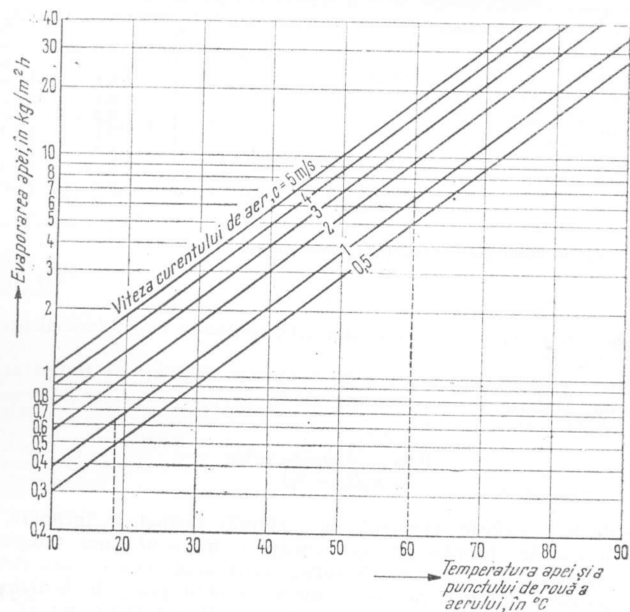


Fig. 13.5. Evaporarea de pe o suprafaţă de apă liber expusă.

Debitul necesar de aer va fi:

$$V = \frac{WA}{(x_2 - x_1)\,3{,}6\,\rho}\ \mathrm{m^3/s}$$

unde: W este evaporarea apei, în $\mathrm{kg/m^2h}$;
x_2 — conţinutul de apă al aerului evacuat la temperatura încăperii, în g/kg aer;
x_1 — conţinutul de apă al aerului admis, încălzit la temperatura încăperii, în g/kg aer;
ρ — densitatea aerului, în $\mathrm{kg/m^3}$;
A — suprafaţa totală de evaporare, în $\mathrm{m^2}$.

Puterea necesară pentru încălzirea aerului admis este:

$$P = \frac{Vc_p(t_i - t_0)\,3600}{860}\ \mathrm{kW}.$$

Pentru scopuri estimative ($t_0 = -10$°C... $+10$°C) se consideră

$$P = 1{,}4V(t_i - t_0)\ \mathrm{kW}.$$

4) Determinarea debitului necesar de aer cu ajutorul numărului de schimburi orare.

Dacă pentru întocmirea calculului nu există datele necesare, cantităţile de aer proaspăt pot fi calculate din tabelele determinate experimental. Din acestea rezultă numărul

Tabelul 13.19. **Cifre pentru schimbul normal şi pentru consumul normal de aer**

Tipul încăperii	Schimbul de aer AE/h	Consumul de aer/persoană m³/h	Observaţii
Baruri, cluburi, cantine, săli de adunări sau de conferinţe	fumat oprit 5... 8	20... 30	Spaţiul necesar pentru o persoană 4... 8 m³
	fumat permis 6...10	30...50	
Birouri:			
— fără accesul publicului	5... 7		
— cu accesul publicului	6...10		
Cinematografe, teatre mici	5... 8	20... 30	
Depozite, magazine	5... 8		
Şcoli	3...5...8	20... 30	
Săli de operaţie	4... 8		
Secţie de spital	3	60...100	
Încăperi de locuit	3		
Dependinţe, toalete	4... 8		
Bucătării:			
— mari	8...15		
— mici	10...20		
Secţie de uzină, atelier:			
— fără vicierea aerului	3... 8		
— cu vicierea aerului	10...20		
Ateliere de pictură, vopsitorie	25...50		
Ateliere de decapare	5...15		
Vopsitorii chimice şi călcătorii	10...20		
Încăperi pentru acumulatoare	5...10		Instalaţie de împiedicare a formării ceţii, cu formulă mai bună ca $V = 110\ In$ ¹)
Încăperi pentru activitate fotografică	10...15		
Garaje	5... 8		
Ateliere mecanice şi încăperi pentru cazane	10...40		Dependent de nivelul de căldură
Instalaţii cu suprapresiune:			
— construcţie solidă	3 5		Pentru prevenirea intrării prafului
— construcţie uşoară	5...10		
Îndepărtarea aburilor din instalaţii de distribuţie	30...60		

¹) V — cantitatea de aer, în m³/h;
I — curentul de încărcare, în A;
n — numărul de elemente.

de schimburi necesar per oră (AE/h) pentru majoritatea tipurilor de încăperi (v. tabelul 13.19). Debitul de aer va fi:

$$V = \text{volumul încăperii} \times \text{AE/h [m}^3\text{/h]}.$$

În cazul unor încăperi destinate locuitului, trebuie inclus şi consumul orar per persoană.

Determinarea presiunii statice

Pentru determinarea presiunii statice este necesar să se facă însumarea următoarelor pierderi de presiune:

— pierderi prin rezistenţa opusă de instalaţie (p_A);
— pierderi de presiune în conducte.

1. *Pierderi prin rezistenţa opusă de instalaţie* (p_A)

Valorile pierderilor de presiune ale diferitelor **aparate** folosite sînt indicate de obicei de către firmele producătoare pentru anumite debite de aer. Pentru recalcularea pierderilor de presiune a acestor aparate pentru alte debite decît cele indicate de firmă se poate folosi formula:

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2.$$

În cazul condiţionării aerului se vor lua în considerare următoarele valori medii:

— filtre .... 5... 10 mm H_2O
— filtre electrice .... 2... 4 mm H_2O
— încălzitoare de aer .... 2... 10 mm H_2O
— baterii de încălzire .... 5... 20 mm H_2O
— clapete de închidere .... 2... 4 mm H_2O.

Tabelele firmelor producătoare dau în mod frecvent pierderile de presiune pentru instalaţii curate de filtrare. Trebuie menţionat că în cazul unor filtre contaminate (murdare) pierderile de presiune pot să sporească adeseori pînă la de 3 ori. Condiţii similare se pot aplica şi bateriilor de încălzire.

2. *Pierderi de presiune în conducte*

Rezistenţa întîmpinată la curgeri în conducte şi ţevi se datoreşte rezistenţei de frecare (pierderi lineare) şi rezistenţei datorită coturilor, ramificaţiilor şi variaţiilor în secţiunea transversală (pierderi locale).

P i e r d e r i   p r i n   f r e c a r e (p_r) (pierderi liniare)

Pierderile prin frecare se calculează din presiunea dinamică p_d pe baza relaţiei

$$p_r = \lambda \frac{l}{D} p_d \ [\text{mm H}_2\text{O}]$$

în care: λ este coeficientul de frecare (v. fig. 13.6);
l — lungimea conductei, în m;
D — diametrul interior al conductei, în m.

Pentru instalaţii normale de ventilaţie, valorile pierdute prin frecare pot fi obţinute cu ajutorul abacei din figura 13.7.

Vom determina întîi viteza aerului în conductă cunoscînd debitul de aer (scara *A*) şi secţiunea transversală a conductei.

Această valoare citită pe scara B se va uni, printr-o dreaptă, cu valoarea diametrului *D*, în cazul conductelor circulare, sau cu valoarea diametrului echivalent D_g, în cazul conductelor cu secţiunea dreptunghiulară — pe scara *D*. Acolo unde această

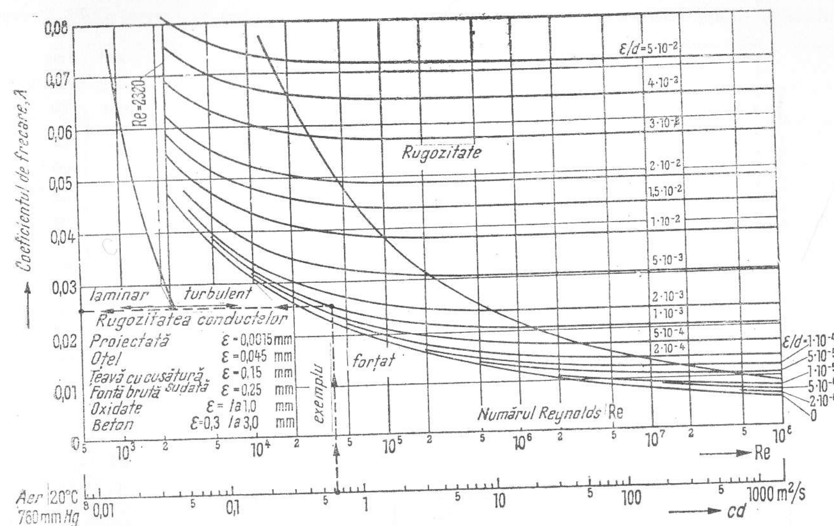


Fig. 13.6. Coeficientul de frecare λ în cazul conductelor drepte, după Prandtl-Kármán-Colebrook.

dreaptă va intersecta scara *C* se va putea citi pierderea de presiune lineară (pierdere prin frecare) pentru un metru linear de conductă. Această valoare este valabilă în cazul conductelor cu suprafaţa netedă. Pentru ţevi de lemn, valoarea găsită se va multiplica cu 1,5, iar pentru ţevi de ceramică sau beton se va multiplica cu 2. Diametrul echivalent pentru ţevi dreptunghiulare se calculează cu relaţia:

$$D_g = \frac{2ab}{a + b}.$$

P i e r d e r i   d e   p r e s i u n e   l o c a l e (p_u).

Pentru instalaţii simple, rezistenţa datorată secţiunilor curbe ale conductelor (pierderile locale) poate fi găsită cu ajutorul abacei (fig. 13.7). Valorile intermediare se pot interpola. Pentru calcule mai precise poate fi utilizat tabelul 13.20, care conţine de asemenea şi coeficientul de rezistenţă pentru ramificaţii şi variaţii în secţiunea transversală a conductei. Pierderile p_u se obţin din formula:

$$p_u = \Sigma(\xi \cdot p_d)$$

Presiunea statică totală, care trebuie produsă de ventilator este astfel:

$$p = \Sigma p_r + \Sigma(\xi \cdot p_d) + \Sigma p_A.$$

La valoarea totală a pierderilor trebuie adăugată presiunea dinamică, corespunzătoare valorii maxime a debitului ce poate apare în sistemul de conducte; în felul acesta, presiunea totală, pe care trebuie s-o dezvolte ventilatorul rezultă:

$$p_t = p + p_{d\,max}.$$

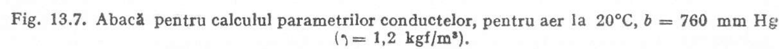


Fig. 13.7. Abacă pentru calculul parametrilor conductelor, pentru aer la 20°C, b = 760 mm Hg (γ = 1,2 kgf/m³).

Tabelul 13.20. **Coeficienţii de rezistenţă ξ pentru conducte circulare şi dreptunghiulare** (valori estimative)

	Modul de curgere a fluidului	ξ	Observaţii
	A. Schimbări de direcţie		
1		1,5	cot cu secţiunea transversală circulară sau dreptunghiulară
2		0,5	cot drept, cu palete de dirijare
3		0,2...0,25	cot drept cu sită fină
4		1,0	cot cu colţuri uşor rotunjite
5		0,6	cot cu colţuri drepte
6		0,2	cot cu colţuri rotunjite
7		0,3 0,15 0,01	curbă de 90°: $r = d$ $r \geqslant 2d$ $r \geqslant 6d$
8		0,05	Curbă de 135° $r \geqslant 2d$
9		0,4 0	liră de dilataţie: $r \geqslant 3d$ $r \geqslant 8d$
10		3,0	două coturi, la 90°, adiacente

Tabelul 13.20 (continuare)

	Modul de curgere a fluidului	ξ	Observații
		B. Conducte ramificate	
1			$\xi_1 = 0$ $\xi_2 \approx 0{,}01...1{,}5$ pentru cazurile A1...A8. Numai pentru conducte ramificate la care $c \approx c_1 \approx c_2$ și $A \approx a_1 + a_2$
2		ξ 1,5 fiecare	Conductă ramificată cu mișcarea aerului în două direcții opuse
3		ξ corespunde lui r din cazul B4 (de mai jos)	Piesă Y (pantalon)
4			Conductă ramificată rotund $k = \frac{r}{d}$
		C. Variația secțiunii transversale	
1		0,6	Aspirație directă în conductă
2		0,4	Aspirație de perete cu muchie dreaptă sau trecere de la secțiune mare la mică

Row B4:

k	0	0,5	2,0	4,0	6,0
ξ	1,1	0,28	0,14	0,07	0,02

Tabelul 13.20 (continuare)

	Modul de curgere a fluidului	ξ	Observații
3		≈ 0	Ajutaj de intrare sau trecere la secțiunea transversală mică prin ajutaj
4	p_d p_d'	—	Pierderi în difuzor $(p_d - p_d')(1 - \eta_D) = \frac{\gamma}{2g}(c^2 - c'^2)(1 - \eta_D)$ Randamentul difuzorului $\eta_D \approx 0{,}75$ pentru unghiul difuzorului mai mic sau egal cu 15° și fără curgere turbulentă
5	p_d p_d'		Pierderi în punctul de impact (lărgire bruscă de secțiune) $\frac{p}{2g}(c - c')^2$ unde $l \leqslant 8d$, altfel pierderile cresc

Limite pentru zgomotul de funcționare

Pentru alegerea ventilatorului, zgomotul de funcționare este în cele mai multe cazuri un factor important, în special acolo unde ventilatorul este exploatat sau instalat în vecinătatea zonelor de locuit.

Dacă ventilatorul este instalat astfel încît zgomotul se poate propaga liber, de exemplu la instalarea pe sau în perete, nivelul zgomotului poate fi determinat cu ajutorul figurii 13.4. Dacă nivelul de zgomot este prea mare, se recomandă a fi alese ventilatoare cu turație scăzută și diametru mare al rotorului, cu condiția ca presiunea necesară să nu fie prea mare. Dacă se folosește un alt ventilator cu model geometric similar de exemplu cu turație de două ori mai mică decît a originalului, diametrul trebuie să fie crescut numai cu $\sqrt[3]{2}$ (conform legilor de similitudine). Viteza periferică a paletelor, care este importantă din punct de vedere al nivelului de zgomot este în acest caz redusă cu 63% și puterea necesară a ventilatorului mai mare este redusă cu aproximativ 40% față de a ventilatorului considerat inițial.

Zgomotul ventilatorului instalat în legătură cu un sistem de conducte în amonte sau în aval, este atenuat într-o măsură destul de mare la instalațiile actuale. Se poate, de asemenea, reduce și mai mult zgomotul prin următoarele măsuri: ventilatoarele să fie asigurate cu elemente de atenuare a vibrațiilor (amortizoare de cauciuc) în scopul de a reduce propagarea zgomotului în clădiri; conductele să fie racordate cu ventilatorul prin intermediul unor legături elastice, în scopul de a reduce propagarea zgomotului în sistemul de conducte; secțiunea transversală a conductelor să fie dimensionată pentru o viteză mică a aerului; de asemenea se utilizează vopsirea carcaselor ventilatoarelor și conductelor cu vopsea antirezonantă precum și acoperirea interioară a tuburilor cu materiale fonoabsorbante.

13.3. CONDUCTE ŞI POMPE PENTRU FLUIDE

Puterea necesară pentru o pompă

Aceasta este dată de relaţia:

$$P = \frac{QH\rho}{102\eta}\ \text{kW},$$

unde:

H este înălţimea manometrică totală de transport, în m col de lichid;

P — puterea necesară pentru pompă, în kW;

n — viteza de rotaţie a pompei, în rot/min;

Q — debitul de lichid transportat, în m^3/s;

ρ — densitatea lichidului, în kg/m^3;

η — randamentul total al pompei.

Valori orientative pentru randamentul total al pompelor;
— pompe cu piston $\eta = 0,8\ldots\ 0,95$;
— pompe rotative $\eta = 0,5\ldots0,85$.

Principii de proporţionalitate aplicabile la pompe

Modificarea vitezei pompei de la n la n_1 are drept rezultat următoarele modificări ale parametrilor:

Tipul de pompă	Debit	Înălţime de pompaj	Puterea necesară
Pompe rotative	$Q_1 = Q\,\frac{n_1}{n}$	$H_1 = H\left(\frac{n_1}{n}\right)^2$	$P_1 = P\left(\frac{n_1}{n}\right)^3$
Pompe cu piston	$Q_1 = Q\,\frac{n_1}{n}$	$H_1 = H$	$P_1 = P\,\frac{n_1}{n}$

Pierderea de presiune prin frecare în conducte

Pierderea de sarcină H_w în conducte rugoase, în cazul apei reci (după Lang) este, dată de relaţia:

$$H_w = \left(0,02 + \frac{0,0018}{\sqrt{vD}}\right)\frac{v^2}{2g}\,\frac{L}{D}\ \text{m},$$

în care: D este diametrul interior al conductei, în m;

L — lungimea conductei drepte, în m;

l — lungimea conductei echivalente pentru curburi, ventile etc., în m;

Re — numărul Reynolds;

v — viteza de curgere a lichidului, în m/s;

z — coeficientul de siguranţă pentru conducte foarte uzate;

λ_n — coeficientul de rezistenţă al conductei în stare nouă;

λ_b — coeficientul de rezistenţă al conductei în stare de funcţionare;

ν — viscozitatea cinematică, în cm^2/s;

g — acceleraţia gravitaţională, în m/s^2;

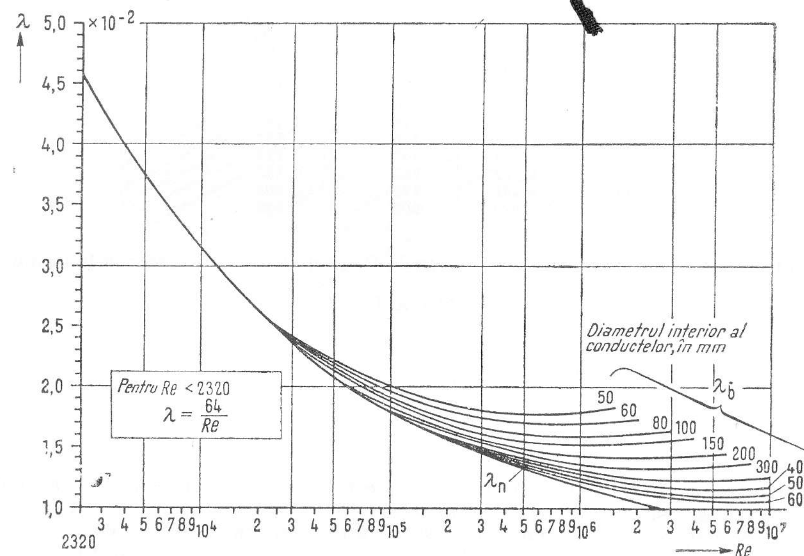


Fig. 13.8. Coeficienţii de rezistenţă λ pentru conducte.

Pierderea de sarcină H_w în conducte drepte, rugoase.

Pentru lichide în general (după Blasius, Galavics şi Poiseuille)

$$H_w = \lambda_b\,\frac{v^2}{2g}\,\frac{L}{D}\ \text{m}.$$

Valoarea λ_b poate fi obţinută în funcţie de numărul Reynolds Re din diagrama din fig. 13.8, în care caz

$$Re = \frac{vD}{\nu} \cdot 10^4.$$

Viscozitate (v. de asemenea tab. 13.22)

Tabelul 13.21. **Comparaţia viscozităţii cinematice ν cu alte unităţi convenţionale de viscozitate**

Grade Engler E	Viscozitatea cinematică ν cm²/s	Al doilea număr al lui Redwood R s	Al doilea număr al lui Saybold S s
1,0	0,010	29,2	31,1
1,5	0,0625	41,4	46,0
2,0	0,118	57,9	66,3
2,5	0,166	73,7	85,2
3,0	0,211	89	104
3,5	0,245	105	122
4,0	0,293	119	140
4,5	0,333	133	157
5,0	0,373	149	174
5,5	0,412	163	192
6,0	0,451	178	209
7,0	0,529	206	242

Pentru viscozităţi mai mari ca 7E (grade Eugler) se aplică următoarele formule:

$$R = 29,2 \times E$$

$$S = 34,5 \times E$$

$$\nu = 0,076 \times E.$$

Unităţi de viscozitate

Germania: „Grade Engler" (E) — raportul dintre timpul de scurgere a unei cantităţi de 200 cm³ ulei la temperatura măsurată şi 200 cm³ apă distilată la 20°C (recipientul de scurgere sau viscozimetrul conform DIN 51560);

Anglia: „Redwood — pe secundă" (R) — timpul de scurgere în secunde din anumite recipiente;

USA: „Saybold — pe secundă" (S) — timpul de scurgere în secunde din anumite recipiente;

Anglia şi USA: 1 poise = 1 dyn·s/cm²;
1 decipoise = 10^{-1} poise;
1 centipoise = 10^{-2} poise;

Lichidul are viscozitatea de 1 poise, dacă o forţă de 1 dynă ce tinde să deplaseze relativ două suprafeţe paralele de lichid de 1 cm² fiecare, distanţa dintre acestea fiind de 1 cm, imprimă acestora o viteză de 1 cm/s.

Apa distilată are la 20°C o viscozitate de aproximativ 1 centipoise.

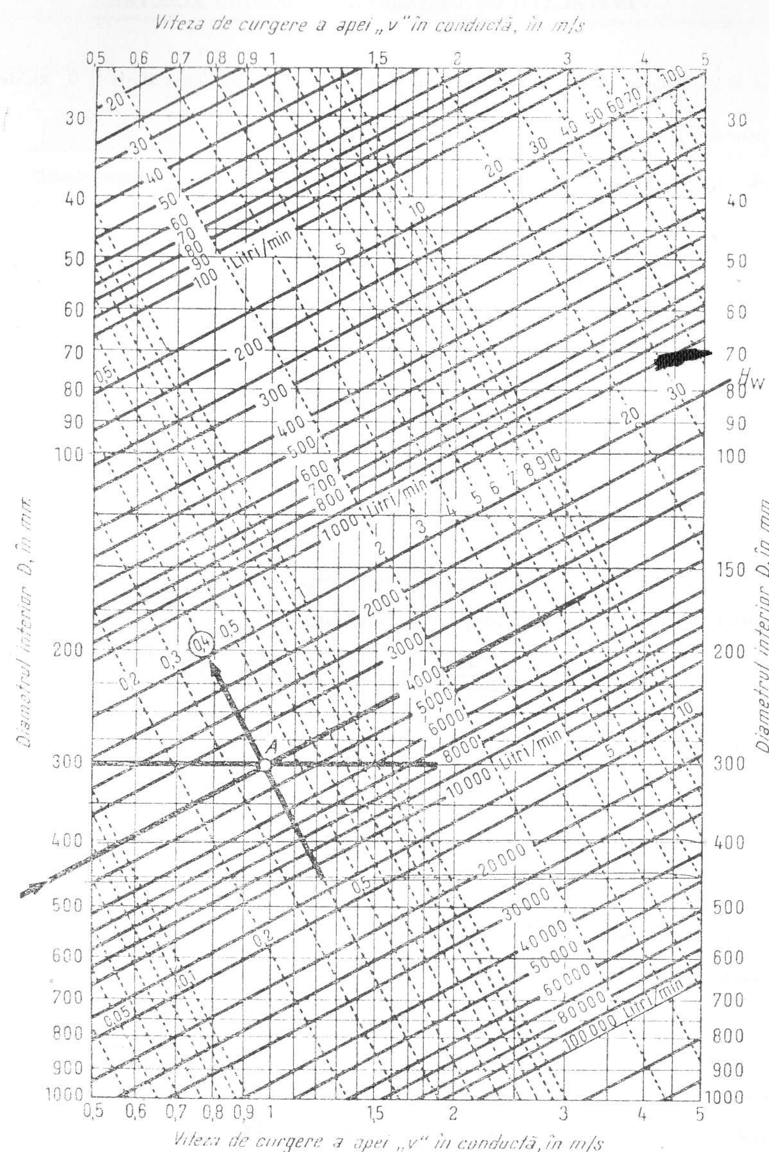


Fig. 13.9. **Determinarea pierderilor prin frecare în conducte standard cu diametrul interior de 30...1000 mm, în cazul apei. Exemplu: La Q = 4000 l/min şi D = 300 mm, H_w = 0,4 m pierderi de sarcină pentru 100 m de conductă.**

Tabelul 13.22. **Valorile viscozității ν în cm²/s în funcție de temperatură (după Hütte și H. Richter)**

Temperatura, °C	0	10	20	30	40	50	60	80	100
Apă curată	0,0179	0,0131	0,0101	0,0081	0,0066	0,0056	0,0048	0,0037	0,0030
Apă de mare cu conținut de sare:									
2%	0,0182	0,0133	0,0103	0,0083					
4%	0,0183	0,0136	0,0106	0,0084					
Petrol [1]		0,0289	0,0232	0,0188	0,0160				
Ulei de lagăre [1]			0,5200		0,200		0,08	0,05	
Ulei de mașină [1]		1,8... 7,3	1,3... 5,0	0,5... 1,7	0,3... 1,05				
Ulei pentru cilindri [1] ..					10,0		1,80	0,70	0,40
Țiței		0,13... 100,0	0,09... 30,0	0,07... 10,0	0,05... 5,0				

[1]) Valori medii.

Pierderea de sarcină H_w în secțiuni curbe, ventile etc.

Pentru lichide în general (după G. Neumann):

$$H_w = \lambda_n z \frac{v^2 \Sigma l}{2gD} \text{ m (pentru } \lambda_n \text{ v. fig. 13.8)}$$

Tabelul 13.23. **Lungimile echivalente ale conductelor, în metri, pentru pierderi locale, pentru conducte rugoase, trase și noi**

Piesa \ Diametru mm	50	100	150	200	250	300	400	500
Cot de 90°, neted ($R = 3D$)....	2,0	3,7	6,0	7,5	9,0	11,2	16,5	21,0
Secțiune curbă din fontă	4,8	11,2	18,7	27,0	36,0	45,0	66,0	82,0
Ventil cu două căi	19,5	46,0	75,0	110,0	150,0	195,0	250,0	400,0
Ventil unghiular standard	15,0	30,0	48,0	67,0	91,0	115,0	172,0	225,0
Ventil Koswa	3,1	7,5	12,7	18,0	24,0	30,0	45,0	73,0
Ventil Rhei	3,0	6,7	12,0	16,5	21,5	27,0	40,0	69,0
Ventil unidirecțional	4,8	11,2	18,7	27,0	36,0	45,0	66,0	89,0
Ventil cu două căi paralele	0,9	2,2	3,0	4,5	6,0	7,5	11,2	15,0

Coeficienții de siguranță se vor considera:
- pentru conducte fără cusătură de oțel, în stare nouă, $z = 1,15$;
- pentru conducte de fontă în stare nouă, $z = 1,20$;
- pentru conducte de fontă ruginite intens, $z = 1,40$

Înălțimea permisă de aspirație a pompelor: presiunea atmosferică în m coloană de lichid

$$B = \frac{10,000}{735,5\,\rho} H_g,$$

unde:

H_g este presiunea atmosferică (absolută), în mm Hg;

ρ — densitatea lichidului ce urmează a fi transportat, în kg/m³;

H_{lc} — pierderea totală de presiune pentru conducte de aspirație, în m coloană de lichid;

H_t — presiunea vaporilor (absolută) a lichidului ce urmează a fi transportat, în m coloană de lichid (v. fig. 13.10);

v — viteza de curgere a lichidului ce urmează a fi transportat, în m/s.

Înălțimea maximă de aspirație H_s se găsește cu relația:

$$H_s < B - H_{lc} - H_t \frac{v^2}{2g} \text{ m col lichid.}$$

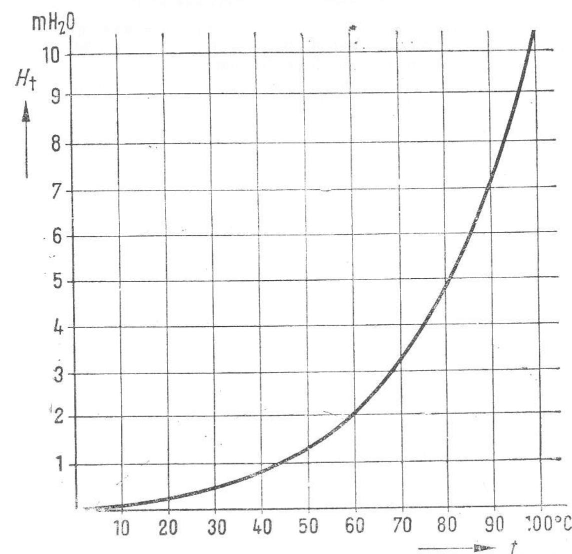


Fig. 13.10. Presiunea absolută a vaporilor de apă la temperatura de funcționare.

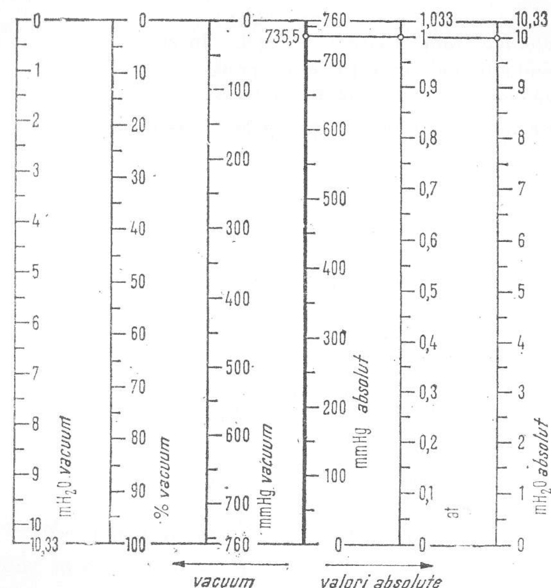


Fig. 13.11. Date comparative pentru presiuni absolute utilizate în mod normal, în domeniul de vacuum. Linia atmosferică la nivelul barometric de 760 mm Hg:

1 atmosferă fizică (atm) = 760 torr = 1,033 kgf/cm² = 760 mm Hg;
1 atmosferă tehnică (at) = 735,5 torr = 1,0 kgf/cm².

Tabelul 13.24. **Maxime ale presiunii atmosferice şi ale densităţii aerului** [1]

Înălţimea deasupra nivelului mării	Condiţii atmosferice				Punctul de fierbere al apei
	Temperatura [2]	Presiune (abs)	Presiune (abs)	Densitate	
m	°C	mm Hg	mb	kg/m³	°C
0	+ 15	760	1013	1,226	100
200	+ 13,7	742	986	1,20	99
500	+ 11,8	716	952	1,17	98
1 000	+ 8,5	673	894	1,11	97
1 500	+ 5,3	623	840	1,06	95
2 000	+ 2	595	792	1,01	93
3 000	− 4,5	540	718	0,92	91
5 000	− 17,5	423	561	0,76	84
8 000	− 37	280	371	0,55	74
10 000	− 50	215	285	0,44	68
20 000	− 56,5	46	61	0,10	37
30 000	− 56,5	11	17	0,03	15

[1]) Pentru valorile lui H_t, pentru apă, v. fig. 13.10.
[2]) Temperatura medie anuală.

13.4. APARATE ELECTROCASNICE

Plite electrice şi maşini de gătit

Reşouri şi plite mici pentru preparatul sumar al mîncărurilor în încăperi mici.

Plite mijlocii pentru garsoniere şi apartamente mici.

Maşini de gătit cu trei sau patru discuri încălzitoare (ochiuri) pentru gospodări normale (combinate uneori cu arzătoare cu cărbune sau motorină pentru încălzirea bucătăriei în timpul sezonului rece).

Plite electrice de tip încorporate în dulapuri sau corpuri pentru bucătării comerciale. Se mai utilizează uneori în gospodării rurale.

Tabelul 13.25. **Dimensiuni şi puteri ale discurilor reglabile pentru maşini de gătit**

Treptele comutatorului [1])	Nr.	0	6	5	4	3	2	1
Diametrul reşoului mm	Nr. de elemente	Puterea elementului încălzitor W	Trepte de putere W					
145	1 2 3	250 250 500	1000	750	500	250	165	100
	1 2 3	750 250 500	1500 [2])	750	500	250	165	135
180	1 2 3	350 500 650	1500	1150	850	300	220	135
	1 2 3	850 300 850	2000 [2])	1150	850	300	220	175
220	1 2 3	600 450 950	2000	1400	950	450	305	200
	1 2 3	800 500 1300	2600 [2])	1800	1300	500	360	250
Scopul:			Fierbere, prăjire, coacere puternică			Fierbere înăbuşită slabă		Încălzire

[1]) Comutator cu 7 poziţii.
[2]) Discuri rapide cu restricţie de putere.

Reşouri cu încălzire prin conducţie — constau din discuri de fontă sau oţel, în care elementul încălzitor este înglobat între nervurile materialului ceramic izolant. Caracteristici: durata mare de viaţă la preţ mic, încălzire uniformă a unei mari suprafeţe; vasele pentru asemenea instalaţii trebuie să aibă baza plată.

Reşouri cu încălzire prin radiaţie — constau din elementele încălzitoare formate din spirale, avînd o capacitate de încălzire mai scăzută; schimbul de căldură făcîndu-se prin radiaţie se poate utiliza orice echipament de bucătărie. Datorită temperaturii înalte, acestea sînt mai costisitoare, necesitînd materiale rezistente.

Reşouri pentru încălzire rapidă cu o putere deosebit de mare (cel mai adesea cu diametrul de 180 mm şi puterea 2 000 W), echipate cu dispozitive de reglare a timpului sau temperaturii funcţie de putere, pentru a evita supraîncălzirea cînd se lucrează fără sarcină.

Reşourile automate — sînt în parte echipate cu regulatoare de putere sau temperatură cu reglaj continuu. Sînt construite în special pentru puteri mari (180 mm diametru, 2 000 W — reşouri Siemens automate, reşouri Regla, reşouri EGO automate).

Consumul mediu necesar pentru o plită fără rezervă de apă caldă, este pentru

2	3	4	5	6	persoane
50	60	70	80	90	kWh/lună

Aceste cifre includ consumul de energie pentru încălzirea unor mici cantităţi de apă pentru prepararea băuturilor. Un prînz complet pentru 4 persoane necesită aproximativ 1 kWh, iar încălzirea cinei aproximativ jumătate din această cifră.

Puterea cuptorului este de 1 800 ...2 100 W. În funcţie de dimensiuni şi de izolaţie, cuptorul este în general ales pentru a fi capabil să atingă o temperatură medie de 200°C în aproximativ 15 min, cînd este gol.

Pentru *grătar* se pot introduce elemente de putere cu radiaţii infraroşii.

Încălzitoare electrice de apă

Boilerele diferă în privinţa dimensiunilor şi a puterii.

Dimensiuni normale: 5 litri pentru bazine de spălare, 8 sau 10 litri pentru chiuvete de bucătărie, 15 litri pentru duşuri, 80 litri pentru băi. Este de asemenea posibilă alimentarea mai multor robinete.

Boilere electrice (neizolate) au ca aplicaţie specială încălzirea apei pentru duşuri sau băi. Servesc de asemenea, pentru a produce apă fiartă pentru bucătării.

Încălzitoare instantanee de apă. Aceste aparate au dimensiuni mici dar putere nominală mare (de exemplu 18 kW...24 kW).

Puterea necesară: 1 kWh furnizează aproximativ

10 litri apă caldă la 85°C sau

20 litri apă caldă la 50°C (spălat partea superioară a corpului) sau

30 litri apă caldă la aproximativ 37°C (higienă personală).

Tabelul 13.26. **Energia medie necesară pentru încălzirea apei în bucătării (rezervoare mici necesare gătitului şi spălatului)**

Numărul de persoane	2	3	4	5	6
Consumul zilnic de apă la 85 °C, în litri/zi	8	10	12	14	16
kWh/zi	0,8	1	1,2	1,4	1,6

Tabelul 13.27. **Energia medie necesară încălzirii apei pentru higiena personală**

	Necesarul de apă caldă la 85 °C l	Temperatura °C	kWh
Baie	50	40	5
Duş	10...15	37	1 ...1,5
Spălat pe mîini	1...2	37	0,1... 0,2
Spălatul părului (bărbaţi)	2...3	37	0,2... 0,3
Spălatul părului (femei)	3...5	37	0,3... 0,5

Încălzirea electrică a încăperilor

Aparatele de încălzit electric au următoarele particularităţi caracteristice: promptitudine, curăţenie maximă, exploatare uşoară şi posibilitatea de a fi amplasate în orice poziţie dorită, cu excepţia încălzitoarelor cu acumulare.

Există diferite aparate, proiectate pentru diferite scopuri.

— *Încălzitoarele cu acumulare* vor deveni un factor important pentru încălzirea completă a încăperilor. Aceste încălzitoare acumulează în timpul nopţii o cantitate de căldură, care apoi este eliberată în timpul zilei. Această formă de încălzire este avantajoasă, economică, în special în zonele cu centrale electrice cu tarif diferenţiat în timpul nopţii (în afara perioadei consumului de vîrf).

— *Încălzitoarele cu acumulare cu reglaj în trepte* au posibilitatea de a realiza un reglaj de putere pornind de la puterea de 1 kW în trepte crescătoare de 0,5 kW. Acestea pot fi folosite pentru reglarea automată a încălzirii încăperilor, dacă sînt prevăzute cu un dispozitiv automat de reglare.

— *Încălzitoarele cu acumulare şi ventilator pe* lîngă faptul că au o mare capacitate de acumulare de căldură, mai au posibilitatea de a selecta, prin intermediul unui regulator continuu, temperatura necesară şi debitul ventilatorului cu două turaţii. Acestea pot fi utilizate pentru încălzirea individuală a încăperilor sau a unor instalaţii complexe. Temperatura constantă a încăperii este asigurată prin intermediul unui control termostatic.

Refrigerarea electrică

În cazul refrigerării electrice, temperatura scăzută este produsă prin evaporarea unui lichid (agentul frigorific).

În procesul de absorbție, circulația agentului frigorific — amoniacul — se realizează prin intermediul energiei termice.

În procesul de compresiune — circulația agentului frigorific FRIGEN se realizează prin intermediul energiei mecanice.

Frigiderele sînt prevăzute cu diferite agregate și sînt marcate cu 1, 2 sau 3 stele

* temperaturi de —6°C și mai jos

** temperaturi de —12°C...—18°C

*** temperaturi de —18°C și mai jos

Tabelul 13.28. **Consumul mediu de energie electrică pentru refrigerare**

Sistemul de refrigerare	Capacitatea frigiderului litri	Consumul (medie anuală) kWh/lună
Proces de absorbție	60...300	40...50
Proces de compresiune	100...300	20...40

Echipamentul congelatorului lucrează pe principiul compresiunii și este realizat din aceleași componente ca și frigiderul. *Dulapurile pentru congelatoare* au în acest caz o capacitate de utilizare mai mare decît vaporizatoarele frigiderelor (verticale) de dimensiuni echivalente.

Sînt recomandate următoarele cifre pentru dimensiunile congelatoarelor pentru deservirea unui locatar:

70...100 litri volum brut pentru locuințe rurale;

60...80 litri volum brut pentru locuințe urbane.

Capacitatea congelatorului în kg se calculează ca fiind circa 60% din volumul brut dat în litri. Astfel un congelator de 300 litri conține 180 kg alimente înghețate.

Standardele germane stabilesc ca pentru fiecare 100 litri de conținut util, congelatorul să fie capabil, ca la o temperatură exterioară de + 32°C să înghețe 7 kg de alimente de la + 25°C la —18°C într-o perioadă de 24 ore.

Pentru congelarea alimentelor este necesară o temperatură cît mai scăzută posibil, mai joasă de —35°C, iar pentru păstrarea acestor alimente, cel puțin —18°C. Consumul mediu anual este cuprins între 1 și 3 kWh/zi.

Tabelul 13.29. **Puteri nominale ale cîtorva aparate electrocasnice**

Aparatul	Puterea nominală W	Aparatul	Puterea nominală W
Încălzitoare de aer	2 000	Congelatoare	150...1100
Filtru automat pentru cafea	1 000	Uscătoare de rufe	600
Spălătoare de vase, automate	3 300	Pătură electrică	150
Aparat pentru măcinat cafeaua	50... 250	Pernă electrică	60
Fier de călcat cu termoregulator	800...1 000	Uscătoare de păr	350... 600
Plite și mașini de gătit:		Uscătoare de mîini	1500
— compacte	3 000...7 300	Încălzitoare de apă:	
— mijlocii	2 500...3 300		
— model mare	7 100...9 800	— bolier de baie, 80 l	4 000...6 000

Tabelul 13.29 (continuare)

Aparatul	Puterea nominală W	Aparatul	Puterea nominală W
— boiler de baie cu acumulare, 80 l	1000...6000	Lustruitor	150
— încălzitor instantaneu de apă	12 000...24 000	Încălzitor radiant	1500
— boiler cu acumulare pentru bucătărie, 8 l	2000	Ceainic rapid	1600
— boiler pentru bucătărie, 5 l	2000	Frigider	100... 200
— boiler cu izolație termică pentru duș, 15 l	2000...4000	Încălzitor cu acumulare pentru încăperi	1000...8000
— boiler pentru spălare, 5 l	2000	Uscător centrifugal	250
Încălzitor prin imersiune	700...1000	Ventilator	10... 25
Reșou individual	1500	Aparat pentru prăjit pîine	800...1000
Fier de călcat (normal)	500	Aspirator de praf	200... 600
Mașină de călcat	1800...3000	Încălzitor de perete	2000
Mixer	120	Radiator de perete	1000...1300
Aspirator de praf pentru mașină	70	Mașină de spălat:	
		— fără încălzitor	300
		— cu încălzitor	2300...4700

Mașini de spălat

În funcție de modul de construcție, se deosebesc mașini de spălat cu recipient de apă staționar, prevăzute fie cu agitator, fie cu șnec, ca mijloc de punere în mișcare a apei — mașini de spălat cu cuvă — și mașini cu tambur. În mașinile cu cuvă, materialul ce urmează a fi spălat trebuie flotat în clăbuci de săpun (15—25 litri pentru 1 kg de material de spălat), în timp ce la spălarea în mașinile cu tambur sînt necesari numai aproximativ 5 litri pentru 1 kg material de spălat, cu o economie corespunzătoare de apă, încălzire și detergent. În Germania, mașinile de spălat cu tambur sînt utilizate aproape exclusiv, cu introducerea materialului prin partea superioară sau prin partea frontală.

În funcție de gradul de automatizare, mașinile de spălat sînt împărțite în mașini manuale, semiautomate și automate, utimele fiind prevăzute cu program automat de spălare, de la înmuierea preliminară pînă la clătirea finală. Dacă mașina de spălat include și procesul de uscare centrifugală în același tambur, ea reprezintă o mașină complet automată. Există de asemenea, mașini automate de spălat și uscătoare centrifugale separate, înglobate însă în același cadru, cu sau fără includerea unui încălzitor pentru uscare.

Uscătoare centrifugale

Uscătoarele centrifugale sînt la ora actuală singurul mijloc folosit pentru a îndepărta apa din materialele spălate; presele și storcătoarele nu mai au de mult timp o utilizare așa de mare. Uscătoarele centrifugale, ca dispozitive independente, sînt în mod normal prevăzute cu motoare asincrone cu 2 sau 4 poli la 2 800 sau 1 450 rot/min. Operațiunea de uscare centrifugală din mașina de spălat automată se efectuează la viteze cuprinse între 350 și 850 rot/min (acționarea comună este efectuată de un motor asincron prin comutarea numărului de poli sau prin intermediul unui mecanism).

Umiditatea reziduală (apa reziduală pentru 1 kg de materiale spălate şi uscate):

— stoarcere manuală	aproximativ 160 %
— uscare centrifugală la 350—600 rot/min	125 — 100 %
— uscare centrifugală la 600—850 rot/min	100 — 85 %
— uscare centrifugală la 1450 rot/min	65 — 70 %
— uscare centrifugală la 2 800 rot/min	40 — 45%

Călcarea materialelor spălate şi uscate

Materialele spălate trebuie să aibă o umiditate reziduală de aproximativ 20%.

Necesarul de putere

Spălarea, clătirea şi uscarea prin centrifugare a unui kilogram de material de spălat în maşini de spălat cu tambur sau maşini de spălat centrifugale, necesită aproximativ 1 kWh, iar uscarea necesită în plus 0,5 kWh (uscare cu fierul de călcat) pînă la 1 kWh (cu dulapul de uscat).

Maşini de spălat vase de uz casnic

Lucrează fie cu palete, pe principiul mişcării turbionare, fie cu pompă de circulaţie, cu un sistem de jeturi. Astfel spălarea farfuriilor, tăvilor paharelor şi vaselor se efectuează în cîteva ape, calde şi reci, care se schimbă complet în fiecare caz. Programul este în general complet automatizat. Un efect bun de spălare se obţine prin stropirea materialului de spălat din toate direcţiile, fără unghiuri moarte, ceea ce implică un consum mai mare de putere şi materiale. Sistemul cu jet, în particular cu braţ rotitor de stropire, este aşadar superior sistemului simplu cu mişcare turbionară. Materialele pentru spălat se introduc prin partea superioară (în principal la sistemul cu palete) sau frontal (la sistemul cu jet). În maşinile de spălat cu introducere frontală pot fi încorporate grupe de 11 articole (de farfurii şi vase), corespunzînd uzanţelor internaţionale.

Pentru apă cu mai mult de 15°dH (grade germane de duritate) este necesară dedurizarea apei aşa-zisa schimbare de ioni) pentru a preveni formarea de pete de calciu.

Spălatul unei garnituri întregi de vase pentru o familie de 4—6 persoane necesită un consum de aproximativ 2—3 kWh şi de aproximativ 50 litri de apă.

PARTEA A PATRA

TEHNICA REGLĂRII AUTOMATE ŞI AUTOMATIZAREA

14. SISTEME DE REGLARE AUTOMATĂ

14.1. NOŢIUNILE FUNDAMENTALE ALE TEHNICII REGLĂRII AUTOMATE

Reglarea automată în buclă deschisă este procesul care are loc într-un sistem în care o variabilă de intrare influenţează o variabilă de ieşire (valoare dorită) în virtutea interrelaţiei matematice inerente din sistem (fig. 14.1).

Reglarea automată în buclă închisă este un proces în care variabila care urmează a fi reglată (mărime reglată) este în permanenţă măsurată şi comparată cu o altă variabilă, mărimea de referinţă. În funcţie de rezultatul acestei comparaţii, mărimea reglată este influenţată în aşa fel, încît să fie adusă mai aproape — ca valoare — de mărimea de referinţă (fig. 14.2).

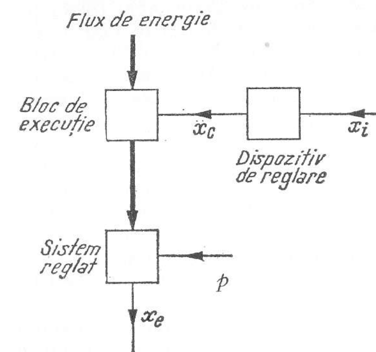


Fig. 14.1. Reglare în buclă deschisă, lanţ de reglare:
x_i — variabila de comandă;
x_c — variabila de execuţie;
p — variabila de perturbaţie;
x_e — variabila de ieşire.

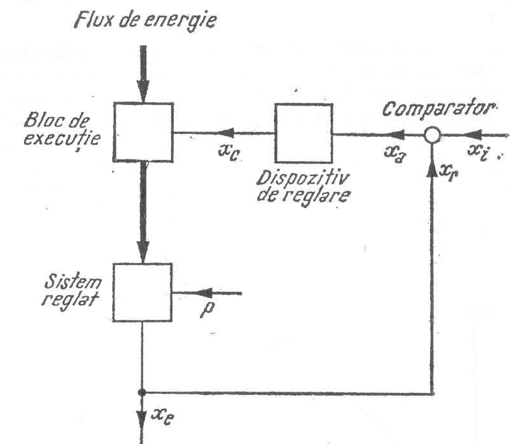


Fig. 14.2. Reglare în buclă închisă, buclă de re lare
x_i — variabila de intrare;
x_a — abaterea (eroarea) de reglare;
x_c — variabila de execuţie;
p — variabila de perturbaţie;
x_r — variabila reglată;
x_e — variabila de ieşire.

Dacă mărimea de ieşire este mărimea măsurată, mărimea reglată şi mărimea de ieşire sînt identice.

Lanţ de reglare automată, buclă de reglare automată

Procesul de *reglare automată* este descris printr-o succesiune deschisă de operaţii într-un *lanţ de reglare automată*. În cazul reglării automate în buclă închisă succesiunea efectivă este înfăptuită într-un circuit închis, *bucla de reglare automată*. În ambele cazuri *mărimea de referinţă* acţionează asupra *mărimii de ieşire* x_e. În cazul reglării automate în buclă deschisă, relaţia dintre mărimea de referinţă şi mărimea de intrare este dată de proprietăţile de transfer ale elementelor lanţului de reglare automată. La reglarea automată în buclă închisă, mărimea de ieşire se apropie de mărimea de referinţă, calitatea acestui proces de apropiere fiind determinată de proprietăţile de transfer ale elementelor din bucla de reglare automată.

Mărime de execuţie, mărime de perturbaţie

Mărimea de execuţie x_c, adică mărimea de ieşire a dispozitivului de reglare automată, influenţează mărimea de ieşire intervenind într-un flux de energie prin intermediul elementului de corecţie.

Mărimile de perturbaţie p care afectează porţiunea de reglare produc variaţii nedorite ale mărimii de ieşire; aceste variaţii sînt contracarate de mărimea de execuţie.

14.2. PROPRIETĂŢILE ELEMENTELOR DE TRANSFER

Proprietăţile de transfer ale unităţilor din lanţul sau bucla de reglare automată care constituie factorii decisivi în procesul de reglare automată sînt simbolizate prin *elemente*. Astfel, elementul de transfer este reprezentat printr-un dreptunghi (bloc) (fig. 14.3). Simbolul în formă de dreptunghi înfăţişează relaţia efectivă dintre mărimea de intrare x_1 şi mărimea de ieşire x_2, care sînt arătate sub forma de *linii de acţiune*. Întrucît acesta este pur şi simplu un mod de reprezentare a informaţiei, mărimile sînt numite *semnale*.

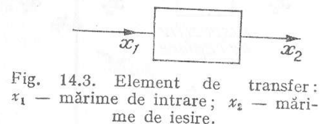


Fig. 14.3. Element de transfer: x_1 — mărime de intrare; x_2 — mărime de ieşire.

Răspunsul tranzitoriu al unui element determină relaţia efectivă dintre semnalul de intrare şi cel de ieşire. Se face distincţie între răspunsul staţionar (permanent) şi comportarea în regim tranzitoriu.

Răspunsul staţionar caracterizează relaţia dintre semnalul de intrare şi cel de ieşire după ce toate procesele tranzitorii s-au stins (v. curba caracteristică în fig. 14.4).

Comportarea în funcţie de timp indică modul în care semnalul de ieşire urmăreşte un semnal de intrare variabil în timp.

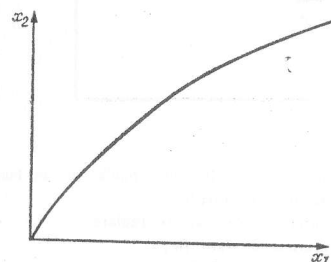


Fig. 14.4. Curba caracteristică în regim staţionar a unui element de transfer.

Clasificarea elementelor după caracteristicile lor statice

În cazul unui element cu acţiune continuă, un semnal de ieşire continuu este atribuit unui semnal de intrare continuu (fig. 14.4). În cazul unui element

cu două stări de funcţionare (stări multiple de funcţionare), două (mai multe) valori ale semnalului de ieşire sînt atribuite la două (mai multe) game de valori ale semnalului de intrare (fig. 14.5 şi 14.6).

Elementele de comutaţie binare sînt elemente cu două stări de funcţionare, în care semnalul de intrare are de asemenea numai două valori (semnal binar) (v. tabelul 14.1) Se face distincţie între *elemente de comutaţie binare* (cuplarea logică a mai multor semnale de intrare binare) şi *elemente de memorare binare*.

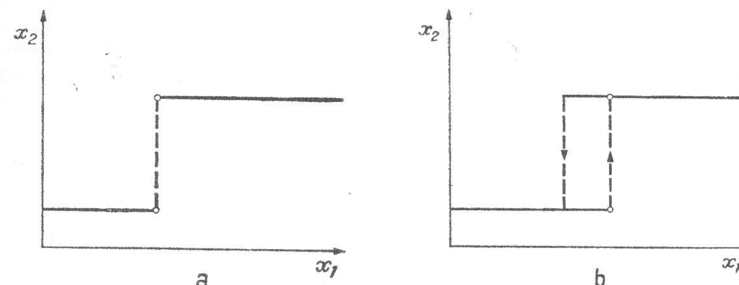


Fig. 14.5. Elemente cu două stări de funcţionare: *a* — fără histerezis; *b* — cu histerezis.

Operaţia de transfer liniară are un element dacă legea superpoziţiei este satisfăcută.

Legea superpoziţiei. Dacă semnalul de intrare x_1^1 formează semnalul de ieşire x_2^1 şi semnalul de intrare x_1^2 formează semnalul de ieşire x_2^2, atunci semnalul de ieşire $x_2^1 + x_2^2$ este atribuit semnalului de intrare $x_1^1 + x_1^2$.

Clasificarea elementelor în funcţie de comportarea lor în timp. Pentru descrierea comportării în timp a elementelor liniare se folosesc următoarele noţiuni:

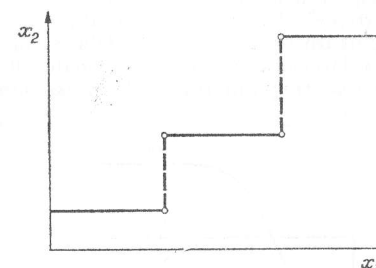


Fig. 14.6. Element cu stări multiple de funcţionare.

Răspunsul în timp este caracterizat prin panta de timp a semnalului de ieşire pentru semnale de intrare tipice (treaptă şi rampă).

Răspunsul în frecvenţă este raportul în regim staţionar, dintre semnalul de ieşire sinusoidal şi semnalul de intrare sinusoidal, pentru toate frecvenţele cuprinse între zero şi infinit.

Tabelul 14.1. **Elemente de comutare binare**

Funcţiunea	Simbolul	Tabelul de funcţiuni	Notaţia logică	Exemplu
Circuit ŞI		x_1^1 x_1^2 x_2 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 1 1	$x_2 = x_1^1 \wedge x_1^2$	
Circuit SAU		x_1^1 x_1^2 x_2 0 0 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1	$x_2 = x_1^1 \vee x_1^2$	
Circuit NU		x_1 x_2 0 1 1 0	$x_2 = \overline{x}_1$	
Funcţia de stocare				

Treapta	x_1^1	x_1^2	x_2	
1	0	0	0	
2	1	0	1	stabilire
3	0	0	1	
4	0	1	0	revenire
5	0	0	0	

Tipurile speciale de *procese* sînt:

Răspunsul la treaptă, răspunsul semnalului de ieşire atunci cînd are loc o variaţie bruscă (în formă de treaptă) a semnalului de intrare (fig. 14.7). *Funcţia indicială* se obţine din răspunsul la treaptă atunci cînd se face raportul dintre semnalul de ieşire şi înălţimea treptei. *Răspunsul la impuls*, răspunsul semnalului de ieşire atunci cînd există un impuls tip Dirac la intrare. Din răspunsul la impuls se obţine *funcţia pondere* atunci cînd se formează cîtul dintre semnalul de ieşire şi aria cuprinsă între semnalul de intrare şi axa timpului (fig. 14.8). *Răspunsul la rampă*, răspunsul semnalului de

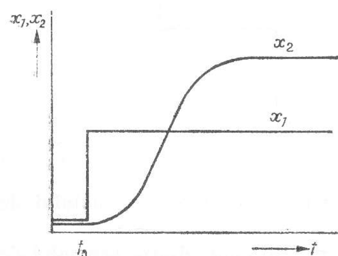


Fig. 14.7. Răspunsul la treaptă (Funcţia indicială).

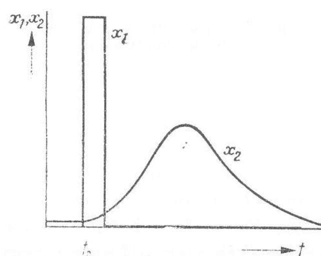


Fig. 14.8. Răspunsul la impuls (Funcţia pondere).

ieşire în cazul unei funcţii rampă a semnalului de intrare care are o viteză de variaţie constantă (fig. 14.9).

Ecuaţia diferenţială liniară

Ecuaţia diferenţială liniară generală a unui element liniar este:

$$E_0 x_1 + E_1 \frac{dx_1}{dt} + \ldots + E_n \frac{d^n x_1}{(dt)^n} = A_0 x_2 + A_1 \frac{dx_2}{dt} + A_m \frac{d^m x_2}{(dt)^m}$$

cu coeficienţii constanţi $E_0, E_1, \ldots E_n;\ A_0, A_1 \ldots A_m$.

Dacă semnalul de intrare x_1 este variabil sinusoidal, semnalul de ieşire x_2 este de asemenea variabil sinusoidal. De aceea, x_1 poate fi înlocuit prin vectorul:

$$x_1 = \hat{x}_1 e^{j\omega t}$$

şi, în mod corespunzător, x_2 poate fi înlocuit prin:

$$x_2 = \hat{x}_2 e^{j(\omega t + \varphi)}$$

obţinîndu-se:

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{E_0 + E_1 j\omega + \ldots + E_n (j\omega)^n}{A_0 + A_1 j\omega + \ldots + A_m (j\omega)^m}$$

Răspunsul în frecvenţă este:

$$F(j\omega) = \frac{x_2}{x_1} = \frac{\hat{x}_2}{\hat{x}_1} e^{j\varphi}$$

în care $\hat{x}_2 / \hat{x}_1$ este raportul amplitudinilor, iar φ este faza. Dacă determinăm, pentru fiecare frecvenţă ω_r, raportul $\hat{x}_{2r} / \hat{x}_{1r}$ al amplitudinilor şi faza φ_r şi introducem valorile funcţiei $F(j\omega_r)$, obţinem punctul de pe hodograful răspunsului cu frecvenţa.

În cazul unei ecuaţii diferenţiale liniare date, hodograful poate fi obţinut prin calcularea sau măsurarea raportului amplitudinilor şi al fazei (fig. 14.10).

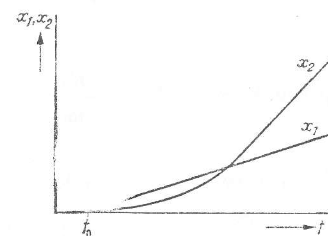


Fig. 14.9. Răspunsul la un semnal în formă de rampă.

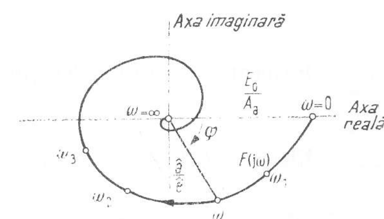


Fig. 14.10. Hodograful $F(j\omega)$.

Combinaţii de elemente liniare elementare se obţin prin combinarea elementelor în conformitate cu tabelul 14.2.

Tabelul 14.2. **Termeni liniari elementari**

Tipul, comportarea	Ecuaţia	Funcţia de transfer	Răspunsul în frecvenţă	Hodograful
P — element proporţional	$x_2(t) = K_p x_1(t)$ K_p — factor proporţional		$Y(j\omega) = K_P$	
I — element integral	$x_2(t) = K_I \int_0^t x_1(t)dt$ K_I — factor integral		$Y(j\omega) = \frac{K_I}{j\omega}$	
D — element diferenţial	$x_2(t) = K_D \frac{dx_1(t)}{dt}$ K_D — factor diferenţial		$Y(j\omega) = K_D j\omega$	
T_t — element de întîrziere	$x_2(t) = x_1(t - T_t)$ T_t — timp de întîrziere		$Y(j\omega) = \exp(-T_t j\omega)$	

Element $PI: x_2(t) = K_P x_1(t) + K_I \int_0^t x_1(t)\,dt, Y(j\omega) = K_P + \frac{K_I}{j\omega}$

Element $PD: x_2(t) = K_P x_1(t) + K_D \frac{dx_1(t)}{dt}, Y(j\omega) = K_P + K_D j\omega.$

Element $PT_t: x_2(t) = K_P x_1(t - T_t), \quad Y(j\omega) = K_P \exp(-T_t j\omega).$

În practică se obţin termeni liniari cu defazaje adiţionale (tabelul 14.3) suprapunînd un defazaj adiţional peste operaţia ideală. Simbolului pentru termen i se adaugă $T_k (k = 1, 2...)$ Indicele exprimă ordinul defazajului.

Tabelul 14.3. **Element liniar elementar cu defazaj în urmă de ordinul 1**

Elementul	Ecuaţia	Funcţia de transfer	Răspunsul în frecvenţă	Hodograful
$P - T_1$	$x_2(t) + T\dot{x}_2(t) = K_P x_1(t)$		$Y(j\omega) = \frac{K_P}{1 + j\omega T}$	
$I - T_1$	$x_2(t) + T\dot{x}_2(t) = K_I \int_0^t x_1(t)\,dt$		$Y(j\omega) = \frac{\frac{K_I}{j\omega}}{1 + j\omega T}$	

14.3. DEFINIŢIILE DISPOZITIVELOR REGLATE

Dispozitivul sau instalaţia reglată este acea parte dintr-un sistem, în care are loc modificarea unei mărimi. Ea poate fi considerată efectiv ca un element de transfer sau o combinaţie de asemenea elemente.

Blocul de execuţie este elementul situat la intrarea instalaţiei care introduce energie. Punctul de aplicare al acesteia este numit poziţie de corecţie.

Poziţia de măsurare este punctul în care este captată mărimea care urmează a fi reglată. *Poziţia de perturbaţie* este punctul de aplicare a perturbaţiei.

Pentru procesul de reglare este esenţială cunoaşterea *proprietăţilor de transfer ale instalaţiei*. Comportarea în regim staţionar este reprezentată prin curba caracteristică a dispozitivului de reglare sau a porţiunii de reglare, pe cînd răspunsul în timp este caracterizat de către funcţia indicială, răspunsul la impuls sau răspunsul în frecvenţă.

Datele caracteristice ale unei instalaţii pot fi definite din *funcţia indicială*. Un mare număr de instalaţii au panta funcţiei indiciale de forma indicată în fig. 14.11. *Instalaţiile cu compensare* ating o valoare finală dată de *valoarea de compensare q*. În instalaţiile necompensate $q = 0$.

Tabelul 14.4. **Exemple cu şi fără compensare**

	Generator de c.c.	Cuptor	Vapor
Mărime de execuţie Mărime de ieşire Valoare de compensare	Tensiune de alimentare Curent de încălzire $q > 0$	Tensiunea rotorului Temperatură $q > 0$	Unghiul cîrmei Traseul $q = 0$

Reprezentînd grafic tangenta în punctul de inflexiune (fig. 14.11), timpul de întîrziere T_u şi *constanta de timp* T_g sînt definite drept caracteristici ale funcţiei indiciale. Valoarea de creştere A a unui sistem este valoarea inversă a vitezei maxime de variaţie

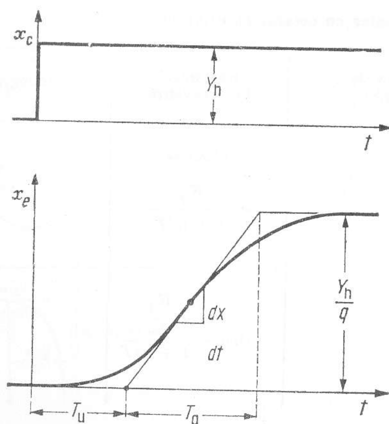


Fig. 14.11. Răspunsul unui sistem la un semnal în formă de treaptă;
x_c — mărimea de execuţie; Y_h—domeniul de reglare; x_e mărime de ieşire; q — valoare de compensare; T_u—timp de întîrziere; T_g — constanta de timp.

a mărimii de ieşire, în situaţia în care are loc o variaţie în salt a mărimii de execuţie x_c între limitele întregului interval de reglare Y_h.

$$A = \frac{1}{(dx/dt)_{max}}$$

Pentru a fi indentificat răspunsul unei instalaţii la o funcţie treaptă, trebuie să fie format ca o funcţie de variaţiile bruşte ale mărimilor de perturbaţie (tabelul 14.5).

Tabelul 14.5. **Exemple de perturbaţii**

	Generator de c.c.	Cuptor	Vapor
Mărime de perturbaţie	Viteza, încărcarea	Şarja, temperatura ambiantă	Deriva vîntului
Mărime de ieşire	Tensiunea rotorului	Temperatura cuptorului	Traseul

Regimul de funcţionare al unei instalaţii poate fi descris complet numai atunci cînd proprietăţile sale de transfer în ceea ce priveşte mărimea de execuţie şi mărimile de perturbaţie sînt cunoscute. Astfel, este necesar să se facă distincţie între răspunsul la treaptă şi răspunsul în frecvenţă al variabilei de ieşire în raport cu variabila de execuţie şi variabila de perturbaţie. Comportarea în raport cu variabila de execuţie poate fi cu totul diferită de aceea în raport cu variabila de perturbaţie.

14.4. DISPOZITIVE DE REGLARE

Denumirea combinată a tuturor elementelor de pe traseul efectiv care influenţează elementul de execuţie este dispozitivul de reglare. Într-un dispozitiv de reglare cu *energie auxiliară* puterea necesară pentru acţionarea elementului de execuţie este obţinută total sau parţial de la o sursă auxiliară de energie.

Un *regulator* este combinaţia de părţi ale dispozitivului de reglare care conţine comparatorul.

Dispozitivul de reglare cuprinde mijloace de măsurare a mărimii reglate pentru compararea acesteia cu mărimea de referinţă şi pentru formarea mărimii de execuţie. Comparatorul formează diferenţa x_a dintre mărimea reglată x_r şi mărimea de intrare de referinţă x_i.

$$x_a = x_i - x_r$$

Eroarea de reglare este valoarea negativă a *abaterii de reglare* $x_r - x_i$ cînd valoarea mărimii de referinţă coincide cu valoarea dorită a mărimii reglate. Valoarea dorită este valoarea necesară pe care mărimea reglată trebuie să o aibă pentru o anumită problemă particulară.

Clasificarea şi caracteristicile principale ale aparatelor de reglare sînt fixate de către proprietăţile de transfer pe care le are aparatul de reglare în calitate de element de transfer. Semnalele de intrare sînt mărimea reglată x_r şi mărimea de referinţă x_i, iar semnalul de ieşire este mărimea de execuţie x_c. În cazul unor *aparate de reglare cu două şi mai multe stări*, mărimea de execuţie poate căpăta numai două sau mai multe valori diferite (fig. 14.12, *a*). În cazul aparatelor de reglare *continue*, mărimea de execuţie poate căpăta orice valoare între limitele domeniului de execuţie (fig. 14.12, *b*).

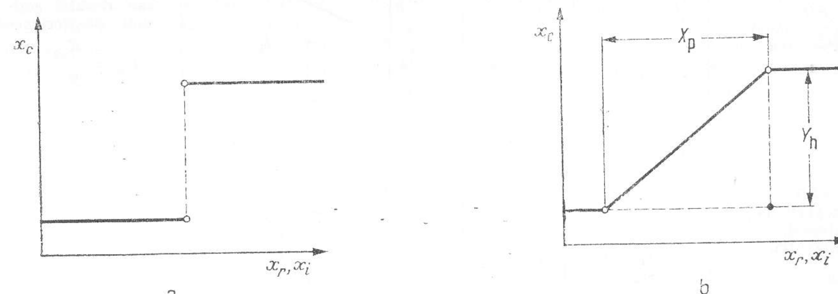


Fig. 14.12. Caracteristicile dispozitivelor de reglare:
a — cu două stări de funcţionare;
b — cu funcţionare continuă (de exemplu *P*).

Răspunsul în funcţie de timp al *dispozitivelor de reglare continue* diferă după elementele de transfer ale acestora.

Vor fi descrise acum formele fundamentale cele mai importante ale dispozitivelor de reglare obişnuite. Acestea sînt alcătuite din elemente liniare elementare şi combinaţii ale acestora sub forma de *dispozitive de reglare idealizate*. Acestea au o comportare liniară şi fără defazare în urmă (tabelul 14.6).

Tabelul 14.6. **Dispozitive de reglare liniare idealizate** (x_c **mărimea de execuție,** x_a **abaterea de reglare)**

Tipul de aparat de reglare	Ecuația	Răspunsul la treaptă	Caracteristici
P proporțional	$x_c = K_P x_a$		Zona proporțională $X_p = \frac{Y_b}{K_p}$
I integral	$x_c = K_I \int x_a dt$		
PI proporțional integral	$x_c = K_P x_a + K_I \int x_a dt$ $x_c = K_p \left(x_a + \frac{1}{T_n} \int x_a dt\right)$		Timpul de restabilire $T_n = \frac{K_P}{K_I}$
PD proporțional diferențial	$x_c = K_P x_a + K_D \frac{dx_a}{dt}$ $x_c = K_P \left(x_a + T_v \frac{dx_a}{dt}\right)$		Timpul de variație sau durata acțiunii de derivare $T_v = \frac{K_D}{K_P}$
PID proporțional, integral, diferențial	$x_c = K_P x_a + K_I \int x_a dt + K_D \frac{dx_a}{dt}$ $x_c = K_P \left(x_a + \frac{1}{T_n} \int x_a dt + T_v \frac{dx_a}{dt}\right)$		

Reacția este o metodă frecvent prevăzută în dispozitivele de reglare pentru a se obține o comportare de transfer dorită. Un dispozitiv de reacție este conectat în paralel cu un amplificator (fig. 14.13). Dacă factorul de amplificare K_v este destul de mare, atunci pentru răspunsul cu frecvența al dispozitivului F de corecție cînd F_g este răspunsul în frecvență al dispozitivului de reacție, este valabilă relația:

$$F = \frac{1}{F_g}\ ;\ x_c = x_a F.$$

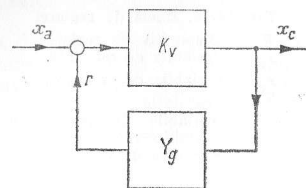


Fig. 14.13. Dispozitiv de reglare cu reacție: r — mărimea de reacție $r = x_c Y_g$.

Ecuațiile răspunsului în frecvență sînt aceleași ca pentru elementele liniare elementare și combinațiile lor (v. tabelul 14.2).

Dispozitivele de reglare practice au defazaje în urmă.

$P - T_1$ aparat de reglare $x_c + T\dot{x}_c = K_P x_a$.

defazaj de ordinul I

$$I - T_1 \text{ aparat de reglare } x_c + T\dot{x}_c = K_I \int_0^t x_a\, dt.$$

În cazul unor defazaje în urmă de ordine mai înalte, există elemente care conțin $\ddot{x}_c$ etc. În ecuațiile de frecvență, polinoamele respective apar la numărător.

14.5. LANȚ DE REGLARE AUTOMATĂ ŞI BUCLĂ DE REGLARE AUTOMATĂ

Procesul de reglare automată este realizat în lanțul de reglare automată sau în bucla de reglare automată. În ambele cazuri, o mărime de intrare acționează asupra mărimii de ieșire. Lanțul de reglare automată și bucla de reglare automată sînt obținute interconectînd aparatul de reglare cu instalația prin intermediul dispozitivului de execuție. Proprietățile de transfer determină procesul de reglare automată.

Tipuri de reglări automate

În cazul unei reglări cu referință, în regimul permanent există o relație clară între variabila de referință și mărimea de ieșire.

În cazul unei *reglări automate cu elemente de menținere* după ce variabila de referință a fost îndepărtată, valoarea atinsă de mărimea de ieșire este menținută; un nou semnal de referință este necesar pentru a schimba valoarea mărimii de ieșire. *Reglările automate cu program* își formează ele însele variabilele de referință în conformitate cu un program. Dacă programul depinde de timp, se utilizează o *reglare automată cu orar*; dacă el depinde de traseu (distanță), reglarea este numită reglare cu plan de traseu.

În cazul *reglării secvențiale*, mărimea de ieșire este reglată de către unități de comutare binare, care funcționează în trepte succesive în conformitate cu un program. Programul poate fi înglobat permanent în sistem sau poate fi extras dintr-o memorie.

Comportarea buclelor de reglare automată

Variația variabilei de referință sau a variabilei reglate inițiază procesele de reglare automată. Dispozitivele instalației și cele de reglare trebuie să fie acordate în așa fel unele cu altele, încît orice abatere de reglare ($x_i - x_r$) care apare, să dispară.

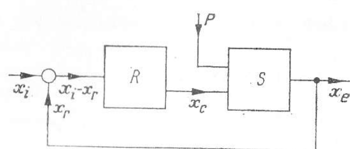


Fig. 14.14. Buclă de reglare:
R — dispozitiv de reglare;
x_i — variabila de referinţă;
x_c — variabila de execuţie;
S — instalaţia;
p — variabila de perturbaţie;
x_r — variabila reglată.
X_e — variabila de ieşire.

Procesele de reglare automată satisfăcătoare (fig. 14.15) pot fi obţinute numai cînd comportarea de transfer a dispozitivului de reglare este adaptată sistemului reglat. Pentru acest caz se aplică legile *sintezei reglării automate*. Dacă se vor întîlni combinaţiile indicate în tabelul 14.7, trebuie să se găsească o ajustare a dispozitivului de reglare care să asigure procese de reglare satisfăcătoare. Altfel poate apărea o comportare instabilă.

Tabelul 14.7. **Combinaţii de instalaţii şi aparate de reglare pentru comportarea stabilă a reglării**

Sistemul reglat / Exemplu / Operaţia	Debit P	Nivel I	Tensiune Presiune $P-T_1$	Traseu $1-T_1$	Viteză Temperatură $P-T_2$	Curea transportoare PT_t
Dispozitiv de reglare	I, PI	P, PI	P, I, PI	PD, PID	PI, PID	I, regulator cu eşantionare

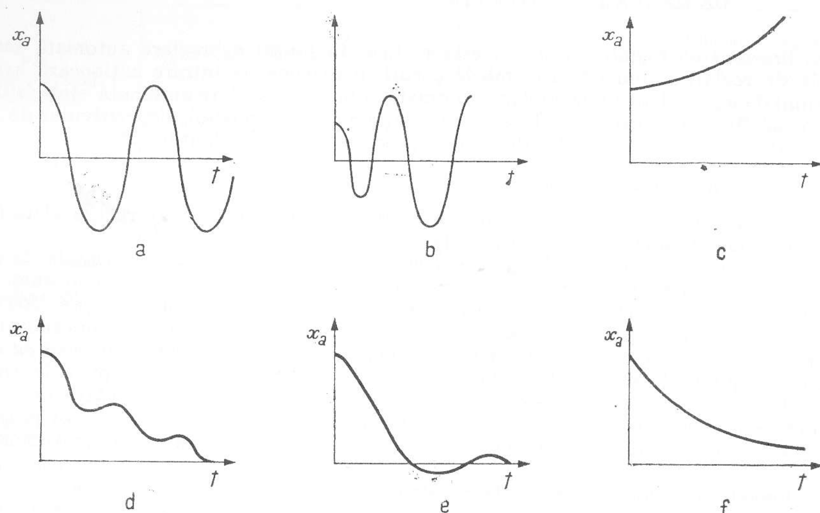


Fig. 14.15. Diagramele proceselor de reglare satisfăcătoare *a...c* şi nesatisfăcătoare *d...f*: — stabil monoton; *b* — stabil periodic; *c* — stabil periodic (de ordin superior); *d* — nestabil onoton; *e* — nestabil periodic; *f* — limita de stabilitate.

Caracterizarea procesului de reglare

Mărimea de eroare este diferenţa dintre mărimea reglată şi *mărimea dorită*, adică valoarea pe care trebuie să o aibă mărimea reglată. Se face distincţie între mărimea de eroare tranzitorie şi staţionară. Există o gamă de toleranţe pentru abaterea valorii dorite.

Timpul de corecţie este timpul care se scurge din momentul variaţiei variabilei de referinţă sau perturbaţie pînă la prima reintrare în domeniul de toleranţă.

Comportarea la mărimea de referinţă şi la perturbaţie a buclelor de reglare

Dacă F_R este răspunsul în frecvenţă al regulatorului, iar F_S este răspunsul în frecvenţă al instalaţiei, răspunsul în frecvenţă la mărimea de referinţă al buclei de reglare este:

$$F_w = \frac{F_R F_S}{1 + F_R F_S}, \quad \underline{W} F_w = \underline{X}.$$

Obiectivul lui F_w este să se apropie cît mai mult posibil de valoarea 1, într-o gamă largă de frecvenţe.

Dacă F_{Sy} este răspunsul în frecvenţă al sistemului, la mărimea de execuţie, iar F_{Sz} este răspunsul în frecvenţă al sistemului, la mărimea de perturbaţie (zgomot), răspunsul în frecvenţă al buclei de reglare la mărimea de perturbaţie este atunci:

$$F_z = \frac{F_{Sz}}{1 + F_R F_{Sy}}, \quad \underline{Z} F_z = \underline{X}$$

F_z trebuie să se apropie cît mai mult posibil de valoarea zero într-o gamă largă de frecvenţe. Fără intervenţia regulatorului este valabilă relaţia:

$$\underline{Z} F_{Sz} = \underline{X}_0$$

Factorul $\dfrac{1}{1 + F_R F_{Sy}} = R$ mai este numit şi *factor de reglare*. El este o mărime complexă.

În circuitele de reglare cu comportarea de tip P a instalaţiei şi a reglării factorul de reglare capătă, pentru $\omega = 0$, o valoare reală:

$$R = \frac{1}{1 + V_0}$$

V_0 fiind amplificarea în buclă a circuitului de reglare deschis.

Factorul de reglare este fracţiunea cu care o variaţie a mărimii de ieşire reglate Δx, provocată de o variabilă de perturbaţie fără regulator, este micşorată prin folosirea regulatorului (diferenţa de reglare reziduală x_w).

$$\Delta x R = x_w$$

Optimizarea regulatorului. Dacă principiile sintezei buclei de reglare sînt respectate, se pot găsi valori ale parametrilor regulatorului care provoacă o funcţiune stabilă, bine amortizată, a instalaţiei. Aceste valori sînt determinate de către parametrii instalaţiei

şi fac posibilă optimizarea procesului de reglare. Rezultatele procesului de reglare sînt determinate în felul următor: *valoarea absolută* şi *optimul simetric* au fost introduse în energetică în calitate de principii de optimizare. În termotehnică şi în tehnica proceselor, metodele de respectare a atenuării oscilografice sînt obişnuite. Acestea provoacă reducerea proceselor de reglare cît mai mult posibil, fără supracreşteri după variaţii ale variabilelor de perturbaţie şi de referinţă.

Aproximativ următoarele valori sînt valabile pentru metoda de optimizare cu caracteristicile definite pentru instalaţie şi aparatele de reglare (tabelul 14.8):

Tabelul 14.8. **Reguli de optimizare şi rezultatele reglării**

Instalaţia	Aparatul de reglare	Poziţia regulatorului		Perioada de decădere	
		Valoarea absolută optimă	Atenuarea oscilaţiei	Valoarea absolută optimă	Atenuarea oscilaţiei
$P - T_1$	I	$K_I = \frac{q}{2T}$	$K_I = \frac{q}{2T}$	8,4 T	9 T
$P - T_2$	P	$K_P = \frac{T_1 q}{2\sigma}$	$K_P = \frac{AY_h}{2Tu}$	8,4σ	9T_u
$P - T_2$	PI	$K_P = \frac{T_1 q}{2\sigma}$ $\tau_1 = T_1$	$K_P = \frac{AY_h}{2{,}2T_u}$ $T_n = 6T_u$	8,4 σ	12 T_u
$I - T_1$	PI	Optim simetric $K_P = \frac{T_1 q}{2}$ $\tau_1 = 4\sigma$	$K_P = \frac{AY_h}{2{,}2T_u}$ $T_n = 6\,T_u$	Optim simetric 17 σ	12 T_u

În valoarea absolută şi în optimul simetric, σ înseamnă suma constantelor de timp mici, iar σ_1 înseamnă constanta de timp în bucla de reacţie negativă a amplificatorului de reglare. $P - T_2$ este o porţiune reglată, cu defazaj în urmă, de ordinul doi; acesta provine dintr-o constantă de timp sau o sumă de constante de timp mici. În termotehnică şi tehnica proceselor ea este caracterizată de întîrzierea T_u şi constanta de timp A. Tangenta iniţială a răspunsului-treaptă este orizontală ca la $I - T_1$.

15. SISTEME CU CIRCUITE ELECTRONICE PENTRU PRELUCRAREA INFORMAŢIEI

15.1. SEMNALE CA PURTĂTOARE DE INFORMAŢII

Semnalele sînt reprezentarea fizică a unui mesaj şi în consecinţă sînt purtătorii informaţiei care trebuie prelucrată. Construcţia şi modul de funcţionare al sistemelor de reglare sînt prin urmare influenţate în mod hotărîtor de tipul semnalelor utilizate.

Prin mărimea amplitudinii lor *semnalele analogice* dau o reprezentare continuă a mărimii care trebuie prelucrată (fig. 15.1).

În traducere liberă „analogic" înseamnă aproximativ „asemănător". De exemplu, tensiunea unui tahogenerator este proporţională cu viteza sau tensiunea unui termocuplu este proporţională cu temperatura şi constituie semnale analogice. Caracteristica fundamentală a semnalelor analogice constă în faptul, că ele pot căpăta orice mărime dorită în intervalul valorilor lor limită.

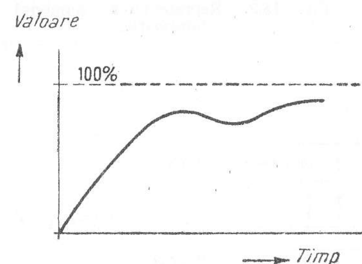


Fig. 15.1. Semnal analogic.

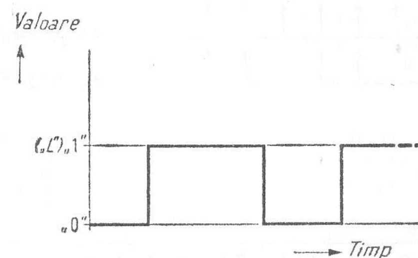


Fig. 15.2. Semnal binar.

Semnalele binare pot să ia fie valoarea „1" (adică să existe) fie valoarea „0" (adică să nu existe). În consecinţă un semnal binar este un semnal de amplitudine constantă care poate diferi numai prin durata sa (fig. 15.2). Semnalele binare au devenit foarte importante în tehnica reglării, deoarece stările semnalului „zero" şi „unu" pot fi realizate uşor şi sigur prin:

contact închis — contact deschis
releu atras — releu întrerupt
ventil deschis — ventil blocat
tranzistor în stare de conducţie — tranzistor blocat.

52 — Memoratorul inginerului electrician — c. 1794

Un *dispozitiv binar* este un element (releu, circuit de comutaţie cu tranzistoare etc.), cu ajutorul căruia pot fi realizate tehnic stările de semnal binar „0" sau „1". O schimbare a stării semnalului unui dispozitiv binar reprezintă prin conţinutul său de mesaj o decizie elementară între două valori posibile. În consecinţă, în limbaj tehnic se spune că el conţine o unitate de informaţie denumită „bit", prescurtare de la „binary digit" (în limba română: cifră binară).

Digital derivă de la cuvîntul englez „digit" (în limba română: număr) şi caracterizează reprezentarea *numerică* a mărimilor analogice prin semnale binare. Un semnal binar poate lua numai cele două valori ale mărimii care trebuie reprezentată. Dacă trebuie reprezentat sub formă de semnal un interval continuu al unei mărimi analogice, pentru a face o „distincţie fină" sînt necesare mai multe dispozitive binare, iar valorile mărimii analogice care trebuie diferenţiată se atribuie combinaţiilor posibile ale stărilor semnalelor lor.

Se spune că mărimea este „cuantificată"; ea poate fi diferenţială în trecerea sa de la un etaj la altul. Întrucît dispozitivele binare formează 2^n combinaţii posibile ale stărilor semnalelor, pentru a forma o mărime analogică cu o precizie de 1% sînt necesare cel puţin şapte poziţii binare; pentru o precizie de 0,1% — zece poziţii binare ($2^7 = 128$; $2^{10} = 1024$).

Un *grup* sau un *cuvînt* este reprezentarea stărilor de semnal ale unei combinaţii de semnale binare corelate (fig. 15.3). Numărul dispozitivelor binare determină *lungimea* cuvîntului; *ponderea* sa corespunde numărului de dispozitive binare care au starea de semnal „1". În mod normal aceşti termeni se utilizează foarte liber.

De exemplu, la calculatoarele numerice grupul este o combinaţie binară de o anumită lungime, de obicei 6 biţi (fig. 15.4), În acest caz cuvîntul are o semnificaţie ierarhic

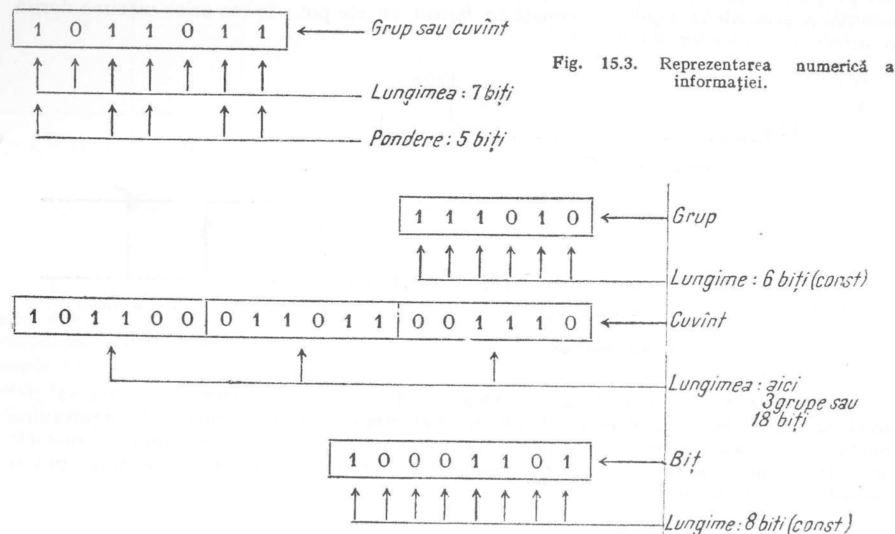


Fig. 15.3. Reprezentarea numerică a informaţiei.

Fig. 15.4. Reprezentarea informaţiei în calculatoarele numerice.

superioară şi caracterizează o combinaţie de mai multe grupuri (în fig. 15.4 de exemplu, un cuvînt = 3 grupuri). Un alt termen este *byte*, care la calculatoare numerice este un grup cu o lungime constantă de 8 biţi.

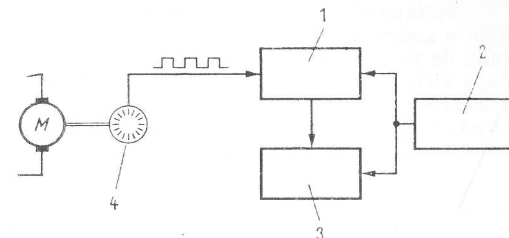


Fig. 15.5. Măsurarea incrementală a unei mărimi analogice (Exemplu: măsurarea vitezei):
1 — numărător (valoare numerică); *2* — bază de timp (perioada măsurătorii); *3* — evaluarea; *4* — cuantificarea unghiului arborelui.

În *reprezentarea incrementală* se aplică condiţia ca diferite mărimi fizice să fie reprezentate proporţionale cu frecvenţa.

Fiecare impuls de frecvenţă dată reprezintă o anumită unitate a mărimii, un increment (creştere) care prin acumulare dă o cantitate totală. În fig. 15.5 este arătată o schemă de măsurare a vitezei, care exemplifică recepţionarea incrementală a unei mărimi analogice. Un cuantificator al poziţiei arborelui este cuplat la arbore şi emite impulsuri proporţionale cu cuplul de rotaţie. Fiecare impuls corespunde cu conţinutul informaţional al unui punct de rotaţie. Prin acumulare într-un numărător, poziţia numărătorului indică unghiul total al rotaţiei sau traiectoria rotaţiei. Raportat la timp, adică considerat într-o anumită perioadă de măsură, se obţine de aici numărul de rotaţii pe unitate de timp sub forma mediei pe perioada de măsură.

Reprezentarea incrementală a unei mărimi fizice printr-o frecvenţă proporţională nu este o prelucrare numerică a semnalelor, deoarece frecvenţa este proporţională cu mărimea, adică este legată printr-un anumit factor de scară, iar scara este o caracteristică elementară a oricărei analogii. Mărimea care trebuie măsurată primeşte o reprezentare numerică numai prin acumularea într-un numărător.

Codul reprezintă o corespondenţă dintre valorile individuale ale unei mărimi şi stările de semnal ale mai multor poziţii binare, prin care aceste valori sînt reprezentate numeric. Pentru a formula mai clar, prin „cod" se înţelege o anumită relaţie dintre două mulţimi de caractere sau simboluri.

Caracterul alfa-numeric este termenul prin care se înţeleg cele zece cifre 0 ...9, cele 26 litere ale alfabetului şi semnele cele mai importante ale punctuaţiei şi ale formulelor.

15.2. SISTEME NUMERICE

15.2.1. Sistemele numerice zecimal şi binar

Să luăm de exemplu numărul 1965. Prin sensul şi expresia sa acest număr este suma valorilor

$$1\,000 + 900 + 60 + 5 = 1965$$

Acest număr se mai poate scrie sub forma următoare:

$$1 \cdot 10^3 + 9 \cdot 10^2 + 6 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0 = 1965$$

Notația arată clar structura sistemului numeric zecimal. Cifrelor 0 ... 9 li se atribuie o anumită valență („pondere"), în legătură cu puterile descrescătoare ale numărului de bază 10, denumite unități, zeci, sute și așa mai departe. Puterile negative de după virgula zecimală dau valorile < 1, adică zecimi, sutimi, miimi și așa mai departe. Ponderea diferiților termeni individuali ai unui număr se exprimă, astfel, prin poziția cifrei înainte și după virgula zecimală. După acest principiu, sistemele numerice se numesc și sisteme de numere „poliadice". Pentru aceste sisteme este valabilă ecuația

$$a_n \mid a_{n-1} \mid \ldots \mid a_1 \mid a_0, \qquad a_{-1} \mid a_{-2} \mid \ldots = \sum_{K-\infty}^{n} a_K B^K,$$

unde a poate să ia o valoare corespunzătoare uneia din cifrele sistemului, iar B este baza sistemului. Baza trebuie să fie întotdeauna > 1. Pentru sistemul numeric zecimal, în concordanță cu cele de mai sus:

$$a = 0, 1, 2, 3 \ldots 9 \text{ (cifre)} \qquad B = 10 \text{ (bază)}.$$

Faptul că semnalele binare pot fi formate și prelucrate în mod sigur stă la baza tendinței de a folosi *sistemul numeric binar* pentru reprezentarea numerelor prin semne binare. Pentru acest sistem, denumit cîteodată sistem dual, sînt valabile.

$$a = 0 \text{ și } 1 \text{ (cifre)} \qquad B = 2 \text{ (bază)}.$$

În sistemul binar 2 ia locul cifrei 10 ca bază a sistemului zecimal. Toate valorile de la 0 la infinit pot fi reprezentate prin cifrele 0 și 1, raportate la puterile descrescătoare în baza 2. De exemplu, numărul 86:

$$1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 86$$

$$64 + 0 + 16 + 0 + 4 + 2 + 0 = 86$$

sau scris sub formă de număr binar:
număr binar: 1 010 110 = valoarea zecimală : 86.

În timp ce sistemul zecimal necesită în acest exemplu numai două poziții (unități și zeci) pentru a reprezenta 86, sistemul binar necesită șapte poziții dar numai două cifre, respectiv 0 și 1. În practică numărul de poziții ale unui număr care trebuie prelucrat este o chestiune de cheltuială; cu toate acestea reprezentarea prin cifre este o problemă fundamentală care poate fi rezolvată cel mai bine în practică prin semnale binare folosind echipamentul modern.

În fig. 15.6 numărul 86 este arătat ca o mărime analogică a unei lungimi etalonate într-o scară corespunzătoare sistemului zecimal, în comparație cu reprezentarea numărului 86 ca număr binar printr-o combinație de relee. Fiecare releu este atribuit unei anumite poziții binare a numărului binar și sînt atrase numai acele relee care trebuie să transmită starea de semnal 1. Pentru comparație, în figură se arată și un

numărător electronic, în care cele șapte circuite bistabile au înregistrat valoarea 86 sub formă de număr binar. Ponderea diferitelor poziții binare ale unui număr binar se obține prin puterile descrescătoare ale bazei 2, și anume:

$$\ldots 64 - 32 - 16 - 8 - 4 - 2 - 1 - 1/2 - 1/4 - 1/8 - 1/16 \ldots$$

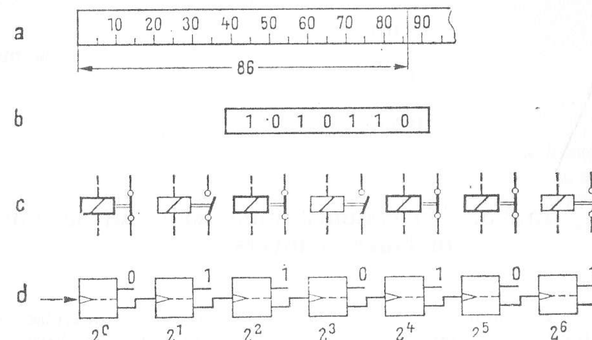


Fig. 15.6. Numărul 86: *a*—valoarea zecimală a unei lungimi, considerată analogic; *b*—ca număr binar; *c*—binar reprezentat prin relee; *d*—ca un conținut al unui număr binar.

15.2.2. Calculul cu numere binare

Deplasarea unui număr binar spre stînga sau spre dreapta echivalează cu înmulțirea cu factorul 2 sau împărțirea cu divizorul 2.

$86 \triangleq$ 1 0 1 0 1 1 0, 0
$172 \triangleq$ 1 0 1 0 1 1 0 0, 0 — o poziție spre stînga
$43 \triangleq$ 1 0 1 0 1 1, 0 — o poziție spre dreapta

Pentru adunarea și înmulțirea oricăror numere binare există reguli de calcul simple care pot fi aplicate în practică relativ ușor

Adunarea		Înmulțirea
0 + 0 =	0	0 × 0 = 0
0 + 1 =	1	0 × 1 = 0
1 + 0 =	1	1 × 0 = 0
1 + 1 = (1)	0 (0 și transport 1 în poziția următoare)	1 × 1 = 1

Exemplul de formare a unei sume[1])

Zecimal	3 + 3 = 6	
Binar	011 + 011 = 110	
	0 1 1	
	+0 1 1	
Transport	(1) (1)	
Rezultă	1 1 0	Procesul calculului
		1 + 1 = 0 (1)
		(1) + 1 = 0 (1); 0 + 1 = 1
		(1) + 0 = 1 ; 1 + 0 = 1

1) Termenii transportului sînt în paranteze

Exemplu de formare a unui produs

Zecimal	$3 \times 2 = 6$
Binar	$010 \times 011 = 110$

$$
\begin{array}{r}
010 \times 011 \\
\hline
010 \\
010 \\
000 \\
\hline
00110
\end{array}
\quad \text{adunate ca mai sus}
$$

15.2.3. Conversiunea numerelor din sistemul zecimal în binar și invers

Cea mai simplă metodă de convertire a numerelor zecimale în binare constă în înjumătățirea repetată a numărului zecimal. Fiecare înjumătățire produce o nouă cifră binară, care este egală cu restul, care poate fi sau 0 sau 1 (un număr par sau impar).

Exemplu:

$$
\left.
\begin{array}{l}
56 : 2 = 28 \text{ rest } 0 \\
28 : 2 = 14 \text{ rest } 0 \\
14 : 2 = 7 \text{ rest } 0 \\
7 : 2 = 3 \text{ rest } 1 \\
3 : 2 = 1 \text{ rest } 1 \\
1 : 2 = 0 \text{ rest } 1
\end{array}
\right\} \uparrow \quad \text{număr binar } 111\,000.
$$

În cazul numerelor zecimale < 1 înjumătățirea se înlocuiește prin dublare. Prin fiecare dublare se obține cifra binară 0, cît timp numărul zecimal nu ajunge la valoarea 1. Cînd acesta devine $\geqslant 1$, urmează cifra binară 1 și o scădere: zecimal — 1. Cifrele binar, citite de sus în jos, dau numărul binar de după virgulă zecimală.
Exemplu: $0{,}005 \rightarrow 0{,}0000110\ldots$

$$
\left.
\begin{array}{llll}
 & 0{,}05 & \times\ 2 = 0{,}1; & \text{poziție binară: } 0 \\
 & 0{,}1 & \times\ 2 = 0{,}2; & \text{poziție binară: } 0 \\
 & 0{,}2 & \times\ 2 = 0{,}4; & \text{poziție binară: } 0 \\
 & 0{,}4 & \times\ 2 = 0{,}8; & \text{poziție binară: } 0 \\
 & 0{,}8 & \times\ 2 = 1{,}6; & \text{poziție binară: } 1 \\
1{,}6 - 1 = & 0{,}6;\ 0{,}6 & \times\ 2 = 1{,}2; & \text{poziție binară: } 1 \\
1{,}2 - 1 = & 0{,}2;\ 0{,}2 & \times\ 2 = 0{,}4; & \text{poziție binară: } 0
\end{array}
\right\} \downarrow \quad \text{număr binar } 0{,}0000110\ldots
$$

O fracție zecimală finită nu dă exact o fracție binară finită. În cazul numerelor zecimale fracționare, numărul întreg dinaintea virgulei zecimale și pozițiile zecimale de după virgulă sînt separate în conformitate cu cele două metode explicate mai sus.

Un număr binar se convertește într-un număr zecimal prin aceea că se ia cifra binară de ordinul cel mai mare și se dublează, apoi se adună a doua cifră semnificativă

la rezultat și se efectuează o nouă dublare, la care se adaugă a treia cifră binară semnificativă și așa mai departe.
Exemplu: $111000 \rightarrow 56$

$$
\begin{array}{r}
1 \times 2 + 1 = 3 \\
3 \times 2 + 1 = 7 \\
7 \times 2 + 0 = 14 \\
14 \times 2 + 0 = 28 \\
28 \times 2 + 0 = 56
\end{array}
$$

Rezultatul este arătat jos în dreapta.

Cînd se convertește un număr binar < 1 într-o formă zecimală, dublarea folosită la numerele > 1 se înlocuiește prin împărțirea cu 2. Cifra binară de pondere cea mai mică se împarte la 2, proxima cifră se adună la rezultat, această sumă se împarte din nou la 2, se adaugă următoarea cifră superioară la rezultat și așa mai departe.

Exemplu: $0{,}10011 \rightarrow 0{,}59375$

$$
\begin{array}{ll}
1 & : 2 + 1 = 1{,}5 \\
1{,}5 & : 2 + 0 = 0{,}75 \\
0{,}75 & : 2 + 0 = 0{,}375 \\
0{,}375 & : 2 + 1 = 1{,}1875 \\
1{,}1875 & : 2 + 0 = 0{,}59375
\end{array}
$$

Rezultatul este arătat jos în dreapta. În cazul numerelor binare fracționare, poziția dinainte și cea după virgula zecimală se convertește fiecare separat.

15.3. CODURI

Sistemul binar ca bază de reprezentare a numerelor prin semnale binare prezintă multe avantaje. Dezavantajul constă, în special în cazul valorilor mari, că numerele binare, ca și numerele romane, nu se citesc ușor și în afară de aceasta există puține posibilități de detectare a erorilor. Acestea au fost cîteva din motivele pentru care s-a creat *codul zecimal* codificat prin „0" — „1". La acest sistem se menține aranjamentul zecimal al reprezentării numerelor și, în consecință, fiecare decadă se convertește în număr binar sau în alt cod în mod separat.

La *codul „unu din zece"* (fig. 15.7) cele zece cifre ale decadei au atribuite zece poziții binare dintre care cea cu numărul 1 corespunde poziției mărimii care trebuie să fie reprezentată. Acest cod, cu cele zece poziții ale sale, este relativ scump și în consecință utilizarea sa se restrînge în special la dispozitivele cu intrarea și ieșirea în zecimal (cum sînt afișajele numerice, claviaturile zecimale).

În cazul *codului bicvinar* din fig. 15.8, pozițiile 1. . . 5 operează cu codul „1 din 5"; poziția 6 memorează un interval al codului „1 din 5" și în consecință conține informația „5". Poziția „0" care operează invers acesteia se folosește numai pentru detectarea erorilor și se omite cînd această proprietate nu este necesară. Acest cod este mai puțin costisitor, circuitele sale sînt relativ simple și de aceea se pretează bine la problemele de numărare.

Codul „2 din 5" din fig. 15.9 funcționează cu cinci poziții. Din cele $2^5 = 32$ combinații posibile, se folosește combinația în care „1" apare de două ori. Acesta este un cod de sistem, întrucît (cu puține excepții) nici o valoare particulară nu poate fi atribuită diverselor poziții binare.

Coloana	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0								1	0
2	0							1		0
3	0						1			0
4	0					1				0
5	0				1					0
6	0			1						0
7	0		1							0
8	0	1								0
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poziţii	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

(Valori zecimale ↓)

Fig. 15.7. Codul „1 din 10".

Coloana	0	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	0	1	0
2	1	0	0	0	1	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0
4	1	0	1	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	0	1	0
7	0	1	0	0	1	0	0
8	0	1	0	1	0	0	0
9	0	1	1	0	0	0	0
Poziţii	7	6	5	4	3	2	1

(Valori zecimale ↓)

Fig. 15.8. Codul bicvinar.

Coloana	Nici o alocaţie				
0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	1
3	0	1	1	0	0
4	0	1	0	0	1
5	0	1	0	1	0
6	0	1	1	0	0
7	1	0	0	0	1
8	1	0	0	1	0
9	1	0	1	0	0
Poziţii	5	4	3	2	1

(Valori zecimale ↓)

Fig. 15.9. Codul „2 din 5".

Codul tetradic, ilustrat în fig. 15.10, este unul din codurile cele mai utilizate, deoarece foloseşte numărul minim posibil de poziţii. Fiecare decadă este reprezentată printr-o tetradă, adică printr-un grup de patru poziţii binare. 10 din cele $2^4 = 16$ combinaţii posibile ale unei tetrade se folosesc pentru reprezentarea cifrelor 0 ... 9 în conformitate cu codul; celelalte şase combinaţii neutilizate sînt denumite *„pseudotetrade"*.

Sistem binar:

Coloana	8	4	2	1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

BCD:

	8	4	2	1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1

Aiken:

	2	4	2	1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
	Corecţia Aiken ↓			
5	1	0	1	1
6	1	1	0	0
7	1	1	0	1
8	1	1	1	0
9	1	1	1	1

Cu exces 3:

	Nici o alocaţie			
0	0	0	1	1
1	0	1	0	0
2	0	1	0	1
3	0	1	1	0
4	0	1	1	1
5	1	0	0	0
6	1	0	0	1
7	1	0	1	0
8	1	0	1	1
9	1	1	0	0

(Valori zecimale ↓)

Fig. 15.10. Codul tetradic.

Codul zecimal codificat binar (codul BCD) utilizează primele 10 din cele 16 combinaţii posibile. Decadele individuale sînt reprezentate astfel în conformitate cu sistemul dual. Prin aceasta se obţine aceeaşi valoare a poziţiei (8—4—2—1) ca şi în sistemul binar, astfel că numărul 86, de exemplu, apare în codul BCD astfel:

$$1000 \quad 0110 \triangleq 86.$$

Codul Aiken utilizează primele şi ultimele cinci combinaţii posibile dintr-o tetradă. Cînd acest cod se foloseşte în numărătoare, pseudotetradele intermediare sînt omise şi acest proces este cunoscut în practică sub denumirea de „corecţie Aiken". De aici rezultă evaluarea poziţională 2—4—2—1 şi avantajul că fiecare decadă după ce ajunge a „9" avansează automat la „0" cu impulsul următor. Numărul 86 codificat în Aiken devine:

$$1110 \quad 1100 \triangleq 86.$$

La *codul cu exces 3* (denumit şi cod Stibitz) prima şi ultimele trei combinaţii nu se folosesc, astfel în exces 3 orice număr are o valoare mai mică cu 3 decît numărul binar corespunzător acestei combinaţii. La acest cod nu este posibilă nici o ponderare poziţională. În codul cu exces 3 numărul 86 capătă următoarea reprezentare:

$$1011 \quad 1001 \triangleq 86$$

Coloana / Valori zecimale	Nici o alocație			
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	0	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	1	1
6	0	1	0	1
7	0	1	0	0
8	1	1	0	0
9	1	1	0	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	0
12	1	0	1	0
13	1	0	1	1
14	1	0	0	1
15	1	0	0	0
Poziții	4	3	2	1

Fig. 15.11. Codul Gray.

În fig. 15.11 este arătat *codul Gray* ca exemplu de cod din grupul de coduri industriale cu cîte o singură schimbare (progresivă). De fiecare dată la trecerea de la un cuvînt al codului la cuvîntul următor se schimbă numai o singură poziție binară. De aceea, la acest cod orice valoare poate fi determinată oricînd în mod sigur, ceea ce constituie o condiție ce nu poate fi asigurată în cazul codurilor cu mai multe schimbări (de exemplu BCD, Aiken, etc). În acest caz orice schimbare eronată simultană a mai multor poziții binare simulează niște combinații eronate. Acest risc există în special la convertirea mărimilor analogice în forma numerică cu ajutorul unor sisteme electromecanice sau a sistemelor cu baleiaj electronic simplu și de aceea în asemenea cazuri codurile cu o singură schimbare au un domeniu larg de aplicație. Codul Gray poate fi extins arbitrar prin adăugarea unor poziții binare suplimentare, dar pentru un cod ponderat folosit la prelucrarea reală a informației acest lucru nu este prea convenabil. În codul Gray numărul 86 se reprezintă astfel:

cu 7 poziții binare: 1111101 ≙ 86
zecimal: 1100 0101 ≙ 86

Codul CCIT No. 2 pentru teleimprimator este codul impus în mod oficial pentru transmisii poștale de caractere alfanumerice. El funcționează cu 5 poziții binare și o deplasare dublă.

Prima deplasare: litere,

A doua deplasare: numere și caractere speciale.

Identificarea faptului dacă un cuvînt de cod trebuie evaluat în sensul primei deplasări sau deplasării a doua se face cu un cuvînt de cod special (Le:111 sau Fi:11011),

Ponderea

0	1					2										3										4					5
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1
0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
→	E	Lif	Sp	Ca	T	A	I	N	O	S	R	H	D	L	Z	G	U	J	W	F	Y	B	M	C	P	K	Q	Fi		V	Le
→	3	Lif	Sp	Ca	5	−	8		9		4			)	+		7		2		6	?	.	:	0	(	1	Fi	/	−	Le
→	−	Lif	Sp	Ca	.	+		,	:		/	?		)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	(		Fi		−	Le

A 2-a deplasare: Codul pentru siguranța numerelor ZSC 3 (nou)
A 2-a deplasare: CCIT Nr. 2 (numere + caractere speciale)
Prima deplasare: CCIT Nr. 2 (litere)

Fig. 15.12. Coduri cu 5 unități: CCIT Nr. 2 și codul ZSC 3 pentru siguranța numerelor.

care fac ca evaluarea să se comute de la o deplasare la alta. Deoarece codul funcționează cu distanța Hamming $d = 1$, el nu permite un transfer sigur al numerelor (fig. 15.12).

Din această cauză pentru numere s-a mai introdus încă o deplasare, *codul cu numere sigure, ZSC3*, la care cuvintele de cod diferă cu $d = 2$, permițînd astfel detectarea erorilor simple.

15.4. FUNCȚIILE FUNDAMENTALE ALE CIRCUITELOR ELECTRONICE

Baza structurii sistematice a circuitelor electronice trebuie raportată la *funcțiile logice* ȘI — SAU — NICI, care sînt denumite circuite logice. Orice prelucrare de semnale binare poate fi raportată la o combinație a acestor trei funcții, dacă se adaugă și funcția dependentă de timp, memoria. Astfel, în principiu, nu are nici o importanță dacă aceste funcții sînt realizate ca mai înainte, prin intermediul releelor, întreruptoarelor și a contactelor lor, sau ca în prezent, prin intermediul circuitelor fără contacte. Aceste module de circuite electronice sînt construite astfel, încît la ieșirea modulului se realizează funcția de bază, care depinde de una, dar de obicei de mai multe intrări.

În fig. 15.13 este arătată funcția ȘI sau *produsul logic* (conjuncția) care pînă acum se realiza de obicei involuntar, printr-o conexiune serie de mai multe contacte. În consecință, circuitul ȘI din comutația statică produce la ieșire semnale x numai cînd există semnale la cele două intrări a și b. Ecuația algebrică a circuitului corespunzător este de forma următoare:

$$F_x = a \wedge b$$

În consecință, funcția de ieșire x este egală cu 1 numai cînd ambele intrări a și b sînt egale cu 1.

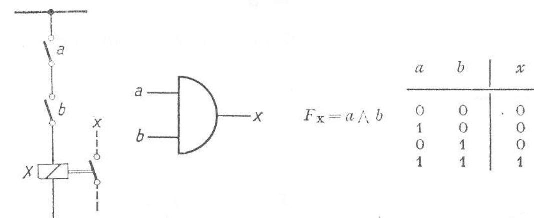


Fig. 15.13. Funcția logică ȘI.

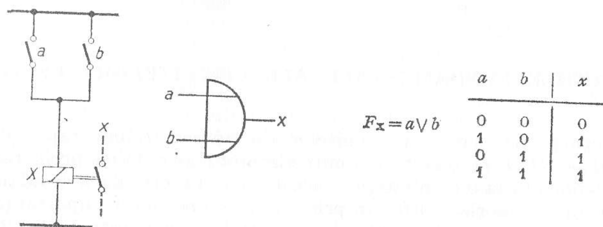
Ca simboluri pentru produsul logic se utilizează frecvent și semnele · sau & (SI latin).

Funcția SAU denumită și sumă logică (disjuncție) se realizează în comutația cu relee cu ajutorul contactelor legate în paralel. Releul X din fig. 15.14 răspunde și prin intermediul contactului său normal deschis dă un semnal de ieșire x cînd unul din cele două contacte a sau b este închis, adică este egal cu 1. Prin urmare, în comutația statică, ieșirea x a circuitului SAU dă semnale la ieșire cînd cel puțin una din intrările a sau b au semnal. Ecuația algebrică a circuitului este

$$F_x = a \vee b$$

Funcţia x a ieşirii este egală cu 1 cînd cel puţin una dintre intrările a sau b este egală cu 1.

În cazul funcţiei NICI sau a logicii NICI, pentru prelucrarea semnalelor binare se foloseşte un modul care dă la ieşirea sa un semnal corespunzător stării inverse celei



a	b	x
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Fig. 15.14. Funcţia logică SAU.

de la intrare. Funcţia NICI inversează semnalul său de intrare într-un semnal de stare opusă. În algebra circuitelor acest lucru se simbolizează printr-o bară aşezată deasupra simbolului contactului sau al semnalului:

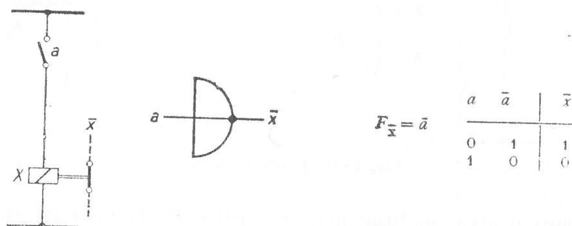
a inversată dă $\overline{a}$

$\overline{a}$ inversat dă $\overline{\overline{a}} = a$

Circuitele din fig. 15.15 satisfac astfel următoarea expresie din algebra circuitelor:

$$F_x = \overline{a}$$

După cum se vede din fig. 15.16, după două inversări de semnal se obţine aceeaşi stare a semnalului.



a	ā	x̄
0	1	1
1	0	0

Fig. 15.15. Funcţia logică NU.

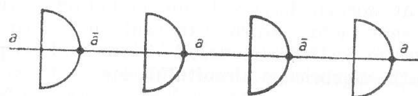


Fig. 15.16. Inversarea multiplă a semnalului a

A patra funcţie fundamentală din prelucrarea semnalelor binare este *memoria*. Cu ajutorul memoriilor semnalele binare pot fi memorate un *timp limitat* sau chiar un *timp nelimitat* (fig. 15.17).

Memoria convenţională cu timp nelimitat se realizează în tehnica circuitelor cu relee prin intermediul unui releu cu autoreţinere. În comutaţia statică există multe tipuri de memorii care se folosesc în tehnică. În general se foloseşte un circuit *bistabil*, format din două circuite de comutaţie binară.

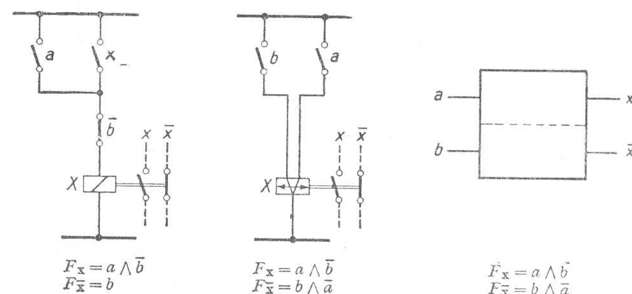


Fig. 15.17. Funcţia memorie (bistabil) pe timp nelimitat.

În principiu, memoria fără contacte funcţionează la fel, ca şi memoria cu relee Ea se comandă cu un semnal sub formă de impuls, care se aplică la intrarea de comandă a. Ieşirea de comandă x devine 1, iar ieşirea de revenire $\overline{x} = 0$. Această stare se conservă pe o perioadă nedefinită pînă ce, prin aplicarea unui impuls la intrarea de revenire b memoria este ştearsă din nou. Prin aceasta, circuitul revine în poziţia normală; ieşirea de comandă x devine iarăşi 0, iar ieşirea de revenire $\overline{x} = 1$.

O întrerupere temporară a alimentării cu energie electrică produce ştergerea automată a majorităţii memoriilor cu timp nedefinit. La toate sistemele la care întreruperea temporară a alimentării cu energie electrică produce ştergerea automată a memoriei poate avea loc o pierdere irecuperabilă a informaţiei şi, de aceea, utilizarea unor „memorii conservante" este foarte importantă. Caracteristica acestor memorii conservante constă în faptul că, la încetarea întreruperii energiei electrice ele revin întotdeauna în starea de informaţie avută înainte de întreruperea acesteia, (de exemplu releele polarizate, memorii cu ferite magnetice, memorii cu bandă magnetică, etc.). Paralel cu memoriile care conservă semnalele pe timp nedefinit memoriile cu *timp limitat* constituie o variantă a acestei funcţii fundamentale. În tehnica releelor există diferite tipuri de relee de timp. Tehnica comutaţiei statice utilizează în cazul cel mai simplu circuite bistabile, cu două module binare la care se produce totuşi o ştergere automată după un timp ajustabil cu ajutorul unei reţele RC. În practică, asemenea circuite sînt denumite circuite *monostabile*. Elementele care funcţionează în acelaşi mod pot fi realizate prin conectarea în serie a elementelor de timp (pasive: combinaţii RC; active: integrator Miller, amplificatoare de curent continuu cu reacţie capacitivă) cu un formator de semnale, care emite la ieşire un semnal binar cînd tensiunea cu creştere exponenţială în timp a elementului ajunge la valoarea de răspuns a formatorului de semnale. Dacă la intrarea unui asemenea etaj de timp se aplică un semnal sub formă de impuls (fig. 15.18), circuitul emite semnale la ieşire pe o perioadă T determinată de circuitul RC.

Astfel, prin funcționarea sa, el se aseamănă cu un releu cu întîrziere la revenire. Întîrzierea unui semnal poate fi realizată și prin combinarea unor etaje de timp cu alte funcții fundamentale.

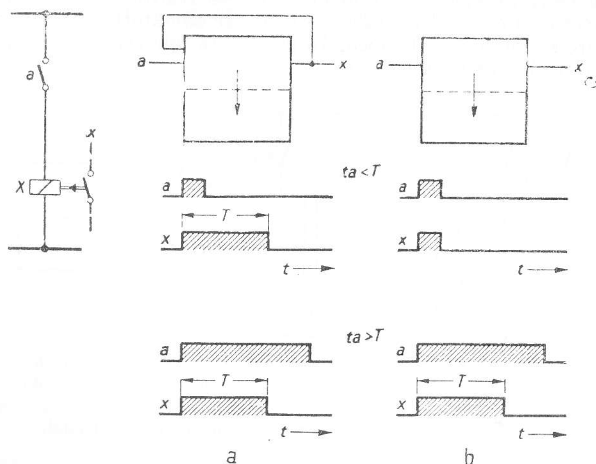


Fig. 15.18. Funcția memorie pe timp limitat (monostabil): *a* — cu funcție de memorie; *b* — fără funcție de memorie.

De obicei, una din ramurile de reacție ale unui etaj de timp se prevede ca o legătură extremă a ieșirii cu una din intrări (fig. 4.6). Cînd această legătură de reacție se întrerupe circuitul pierde comportarea de memorie. În acest caz circuitul memorează semnalul pe toată perioada numai dacă semnalul de la intrare persistă mai mult decît durata perioadei respective. Astfel, la dispariția semnalului de intrare, el revine în poziția de ieșire indicată prin săgeată.

15.5. ALGEBRA CIRCUITELOR

Algebra circuitelor permite ca un circuit să fie proiectat și simplificat prin metode matematice. Cunoașterea acestora dă posibilitatea unei înțelegeri profunde a structurii prelucrării semnalelor binare, în special în tehnica comutației statice. Regulile de calcul cele mai importante vor fi explicate în cele ce urmează cu ajutorul unor exemple simple, luate din tehnica comutației cu relee.

Conectarea în serie a mai multor contacte cu aceleași funcții echivalează cu utilizarea numai a unui singur contact; în consecință, orice putere a unei variabile poate fi simplificată, fiind egală cu puterea întîi

$$F_x = a \wedge a \wedge a \ldots = a^n = a$$

$$F_x = \overline{a} \wedge \overline{a} \wedge \overline{a} \ldots = \overline{a}^n = \overline{a}.$$

În mod similar, la conectarea în paralel a mai multor contacte cu aceeași funcție toți factorii > 1 pot fi eliminați:

$$F_x = a \vee a \vee a \vee \ldots = n \cdot a = a.$$

$$F_x = \overline{a} \vee \overline{a} \vee \overline{a} \vee \ldots = n \cdot \overline{a} = \overline{a}$$

Legarea în paralel a contactului normal închis și a celui normal deschis de la același releu echivalează cu un circuit permanent închis (=1):

$$F_x = a \vee \overline{a} = 1.$$

Conectarea în serie a contactului normal deschis și a celui normal deschis ale aceluiași releu dă o combinație echivalentă cu un circuit întrerupt (=0):

$$F_x = a \wedge \overline{a} = 0.$$

Un circuit întrerupt permanent se conectează în paralel cu contactul *a*; aceasta nu influențează funcția contactului:

$$F_x = 0 \vee a = a.$$

Un contact *a* este scurtcircuitat printr-o conectare în paralel a unui circuit permanent închis.

$$F_x = 1 \vee a = 1.$$

Un circuit permanent întrerupt este conectat în serie cu contactul *a*·

$$F_x = 0 \wedge a = 0.$$

Un circuit permanent închis care nu influențează funcționarea unui contact este conectat în serie cu un contact *a*:

$$F_x = 1 \wedge a = a.$$

Legile inversiunii: un circuit realizează funcția inversă dacă în locul contactelor din spate se utilizează contactele frontale, respectiv invers, iar conexiunea paralelă a contactelor se înlocuiește printr-o conexiune serie și conexiunea serie cu o conexiune paralelă:

$$F_x = a \wedge \overline{b} \wedge \overline{c} \wedge d \rightarrow \overline{F_x} = \overline{a} \vee b \vee c \vee \overline{d}$$

$$F_x = a \vee \overline{b} \vee \overline{c} \vee d \rightarrow \overline{F_x} = \overline{a} \wedge b \wedge c \wedge \overline{d}$$

La definirea algebrică a unui circuit cu diode, care se utilizează des în decuplări fără reacție a unor legături în circuitele cu relee, dioda prezintă în sensul invers amplificarea $K = 0$ și este considerată ca un contact permanent deschis, iar în sensul de conducere are $K = 1$ și echivalează cu un contact permanent închis. Rezultă prin urmare următoarele reguli:

$$\overline{K} \wedge K = 1 \wedge 0 = 0,$$

$$\overline{K} \wedge a = 1 \wedge a = a,$$

$$K \wedge a = 0 \wedge a = 0,$$

$$\overline{K} \vee a = 1 \vee a = 1,$$

$$K \vee a = 0 \vee a = a.$$

15.6. SIMBOLURI DE COMUTAŢIE FOLOSITE ÎN SISTEMELE DE COMUTAŢIE ELECTRONICĂ

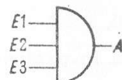
Simbol general pînă la 3 intrări



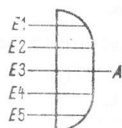
Simbol general pentru mai mult de 3 intrări



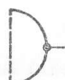
Funcţia ŞI cu 3 intrări



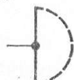
Funcţia SAU cu 5 intrări



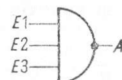
Simbolul inversiunii (negaţiei) cu o ieşire



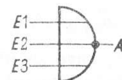
cu o intrare



Funcţia ŞI cu inversarea semnalului la ieşire; element ŞI-NU



Funcţia SAU cu inversarea semnalului la ieşire; element NICI



Element ŞI-NU cu 2 grupe de intrări SAU (SAU înainte de ŞI-NU)

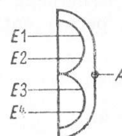
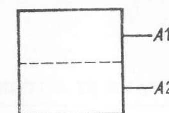
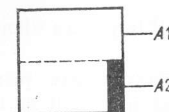


Fig. 15.19. Simbolurile din comutaţia statică.

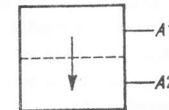
Funcţionare bistabilă generală



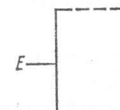
Funcţionare bistabilă cu poziţie preferenţială



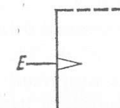
Funcţionarea monostabilă



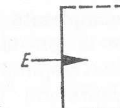
Intrare statică



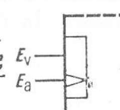
Intrare dinamică: activă la modificarea semnalului de la „0" la „1"



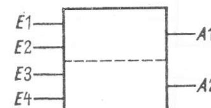
Intrare dinamică la modificarea semnalului de la „1" la „0"



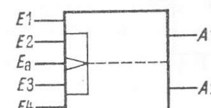
Circuite de intrare cu pregătire; E_v = intrare pregătitoare statică; E_a = intrare de comandă dinamică de la „0" la „1"



Bistabil, de fiecare parte 2 intrări statice cuplate după SAU



Bistabile; de fiecare parte o intrare statică şi una pregătitoare; cîte o intrare de comandă pentru ambele părţi



Monostabil; partea de comandă cu 3 intrări SAU statice; partea de ştergere cu o intrare statică

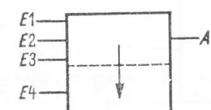


Fig. 15.20. Simbolurile circuitelor cu reacţie.

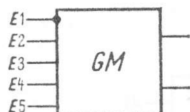
Simbolurile de comutație au fost stabilite pentru identificarea funcțiilor modulelor din sistemele electronice de comutație.

În fig. 15.19 *elementele logice* sînt reprezentate printr-un semicerc, care poate fi extins în mod corespunzător cînd prezintă mai mult de trei intrări. Intrările cuplate în concordanță cu funcția ȘI se termină cu linia dreaptă a semicercului. Intrările cuplate în concordanță cu funcția SAU se termină în linia curbă a semicercului.

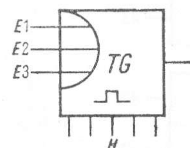
Inversiunea, adică inversarea semnalului, se indică printr-un punct. Punctul aplicat la o intrare înseamnă că intrarea devine activă la semnale „0". Dacă se prevede cu punct o ieșire, legătura reprezentată realizează o inversare a semnalului la partea de ieșire. Modulele care cuprind o combinație de funcții logice se reprezintă prin combinația logică a simbolurilor.

În fig. 15.20 *circuitele bistabile* sînt reprezentate printr-un dreptunghi. O linie centrală prevăzută cu punct separă cele două circuite de comutație cu reacție, din care este format bistabilul. Dacă bistabilul are o poziție preferențială, aria înnegrită indică partea care primește starea de semnal „1" după conectarea la rețea. O săgeată în simbolul unui circuit bistabil indică o comportare monostabilă. Săgeata indică direcția a cărei ieșire este prevăzută în stare normală cu semnalul „1". Bistabilele pot fi comandate fie static fie dinamic. Intrările care răspund la amplitudinea semnalelor (comandă statică) se termină la linia de contur. Intrările comandate dinamic se termină printr-o săgeată. Dacă săgeata este înegrită înseamnă că intrarea este comandată la schimbarea semnalului de la „1" la „0". Tot așa o săgeată necompletată indică faptul că intrarea reacționează la variația semnalului de comandă de la „0" la „1". Dacă o intrare dinamică se leagă cu una sau mai multe intrări care răspund la comenzi pregătitoare static, aceste intrări se încadrează printr-un mic dreptunghi. Intrările comune ambelor părți se termină la linia centrală a simbolului. Modulele cu funcții speciale sînt reprezentate printr-un dreptunghi cu intrare corespunzătoare. În fig. 15.21 sînt arătate cîteva exemple.

Etaj bistabil GM; Intrare de inhibiție E1; Intrări de comandă E2...E5 pentru diferite valori la ieșire



Generatorul impulsurilor de sincronizare TG; Intrări de inhibiție E1...E3 cuplate după SAU; Conexiuni speciale pentru R și C



Etaj de putere; 3 intrări statice cuplate după SAU

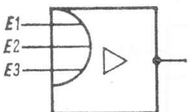


Fig. 15.21. Simboluri pentru module cu funcții speciale.

16. APLICAȚII DIN TEHNICA REGLĂRII AUTOMATE

16.1. COMANDA NUMERICĂ A MAȘINILOR UNELTE

Circuitele de comandă numerică — SINUMERIK — fac posibilă comanda directă a mașinilor folosite în producție, în special a mașinilor unelte, prin introducerea valorilor care trebuie măsurate. Informațiile necesare pentru diverse operații de prelucrare se introduc prin intermediul benzilor perforate și cuprind indicații referitoare la poziții și la comenzile de întrerupere.

Lectorul de bandă perforată convertește combinațiile perforate în semnale electrice, iar *convertorul de coduri* formează cu ajutorul acestora semnale de comandă interne care sînt înmagazinate în memoria pozițiilor și a *instrucțiunilor* de întrerupere. Valoarea reală, măsurată la mașină cu ajutorul unui traductor se compară cu valoarea nominală din memorie și, ca rezultat, se emite spre mașină un semnal de comandă (fig. 16.1 și fig. 16.2).

Măsurarea valorii reale

Valoarea numerică incrementală prin cuantificarea traiectoriei procesului; elementul de măsură este un traductor de trepte unghiulare.

Valoarea analogică absolută prin simularea electrică a poziției mașinii; elementele de măsură sînt generatoare de funcții și traductoare inductive cu scară liniară.

Tipuri de comenzi

Comanda punctului — selectarea poziției urmată de blocarea uneltei.
Aplicații: mașini de găurit sau de alezat.

Comanda cursei: mișcarea axială paralelă cu scula angajată
Aplicații: mașini de frezat, strunguri.

Comanda traiectoriei: deplasare simultană, definită matematic, a două sau mai multe axe.
Aplicații: freze, strunguri, mașini de tăiere autogenă, raboteze.

Interpolatorul determină la comanda traiectoriei valorile intermediare dintre două puncte de sprijin; de exemplu, în cazul unei linii drepte, între punctul de sprijin și punctul final, raportate la punctul inițial.

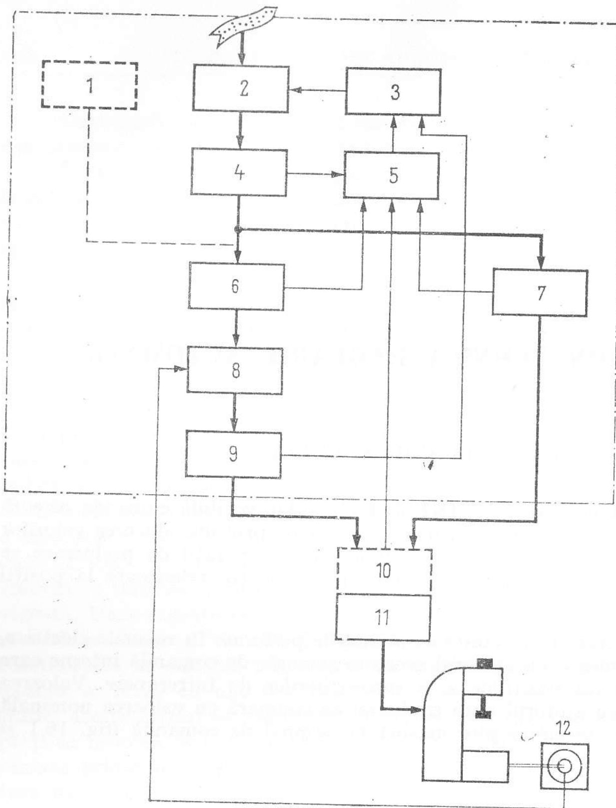
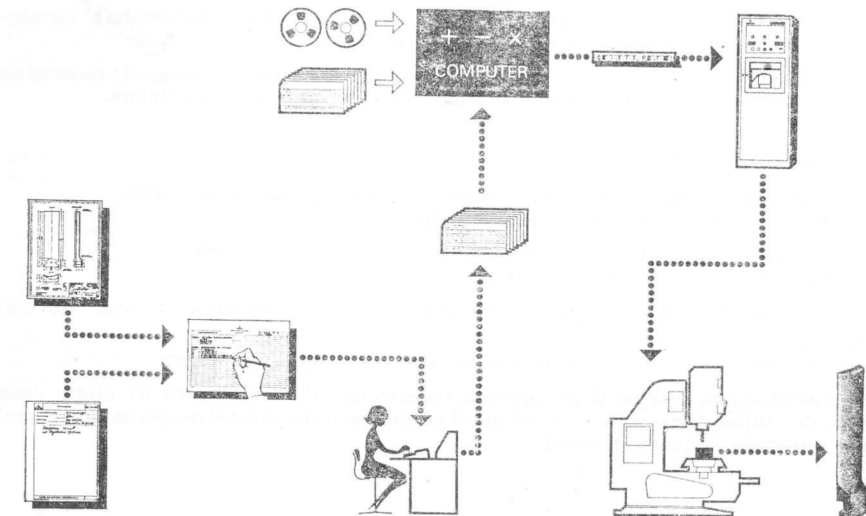


Fig. 16.1. Schema-bloc pentru comanda numerică a maşinilor unelte.
1 — intrare manuală; *2* — lector bandă perforată; *3* — element pentru comanda citirii; *4* — decodificator; *5* — element pentru controlul sintaxei; *6* — memoria poziţiei; *7* — memoria instrucţiunii de comutare; *8* — element pentru măsurarea traiectoriei poziţiei; *9* — element de comparaţie şi pentru logica intrării; *10* — element adaptor; *11* — element pentru comanda maşinii; *12* — traductor.

Fig. 16.2. Fluxul informaţional de la desen la piesa prelucrată — la sistemul SINUMERIK în cazul comenzii cu program. Programarea este raţionalizată cu ajutorul sistemului de prelucrare a informaţiei.



Adaptarea programului la sistemul de prelucrare a informaţiei

Piesa prelucrată este descrisă simbolic cu ajutorul unui „limbaj de programare". Sistemul de prelucrare a informaţiei produce, cu ajutorul subprogramului traductor („compilator") şi a subprogramului „de prelucrare ulterioară", banda perforată folosită de maşina unealtă.

16.2. SISTEMELE DE COMANDĂ TRANZISTORIZATE FOLOSITE ÎN TEHNICA ACŢIONĂRILOR ELECTRICE ŞI ENERGETICE

16.2.1. Structura de bază şi aplicaţii analogice

Aparatele de comandă tranzistorizate Siemens sînt utilizate de mulţi ani în toate ramurile industriale şi în diferite domenii. Ramurile principale ale aplicaţiei sînt acţionările electrice şi energetice.

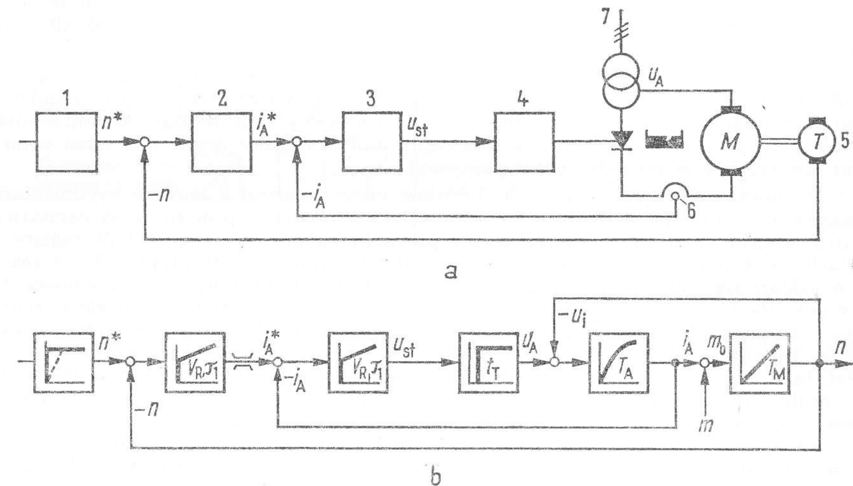


Fig. 16.3. Exemplul unui sistem de reglare în cascadă SIEMENS, tranzistorizat: reglarea vitezei la o acţionare electrică de c.c., alimentată prin tiristor, cu reglarea auxiliară a curentului rotoric (excitaţie constantă).
a — schemă electrică de principiu: *1* — indicatorul valorii de referinţă; *2* — regulatorul vitezei; *3* — regulatorul curentului rotoric; *4* — unitatea de comandă prin impulsuri; *5* — generator tahometric; *6* — indicatorul valorii reale a curentului rotoric; *7* — alimentarea; *b* — schemă de structură; n — valoarea reală a vitezei; n^* — valoarea de referinţă a vitezei; i_A — valoarea reală a curentului rotoric (curentul rotoric este proporţional cu cuplul electric); i^*_A — valoarea nominală a curentului rotoric; U_{st} — semnalul de intrare al unităţii de comandă prin impulsuri (semnal de ieşire al regulatorului de curent); U_A — tensiunea convertorului care se aplică indusului; U_i — tensiunea contra-electromotoare din indus; m_b — cuplul acceleraţiei; m — cuplul de sarcină; $V_R{}^i$, τ_i — parametrii de acordare ai regulatorului (regulator PI); t_T — timpul mort al convertorului (valoarea medie statistică); T_A — constanta de timp din circuitul rotoric; T_M — constanta de timp mecanică.

Aceste sisteme de comandă automată sînt construite, în general, în conformitate cu principiul buclelor de reglare în cascadă.

În fig. 16.3, se arată un exemplu de reglare a vitezei la o acţionare în curent continuu cu tiristoare cu reglare auxiliară a curentului din indus (schema funcţională şi schema structurii dinamice). Fiecare buclă are un regulator propriu şi, în exemplul dat, bucla de reglare a curentului (bucla de reglare interioară) are un regulator pentru curentul indusului (regulator *PI*) iar bucla de reglare a vitezei (bucla de reglare exterioară) are un regulator de viteză (regulator *PI*). Bucla auxiliară, pentru reglarea curentului indusului, apare pentru regulatorul de viteză mai mult sau mai puţin ca un element integrator de ordinul întîi (cu constanta de timp echivalentă).

La nevoie se poate introduce încă un regulator de acceleraţie, între regulatorul de viteză şi regulatorul curentului din indus, realizîndu-se astfel un sistem de reglare cu trei bucle. De asemenea, înaintea regulatorului de viteză poate fi conectat, în serie, un generator de funcţie rampă pentru acceleraţie, care adaptează valoarea vitezei cu funcţia liniară în formă de rampă pentru a evita variaţii bruşte la intrarea regulatorului.

Subdivizînd în felul acesta sistemul de reglare total, se obţin bucle separate, care se observă dintr-o dată. Fiecare din regulatoarele asociate acestor bucle se caracterizează prin maximum 3 parametri, sistemul putînd fi astfel optimizat uşor. La punerea în funcţiune a sistemului, buclele de reglare pot fi ajustate succesiv una după alta, începînd cu cea interioară.

Prin semnalul său de ieşire, regulatorul buclei exterioare transmite valoarea impusă regulatorului conectat în serie după el. În fig. 16.3, regulatorul de viteză dă regulatorului curentului din indus valoarea impusă a curentului i^*_A. Prin limitarea acestui semnal variabila reglată din bucla auxiliară este menţinută în limitele dorite (limitarea curentului din indusul maşinii de curent continuu).

De multe ori este necesar să se imprime vitezei maşinii o variaţie suplimentară deasupra sau sub viteza de bază (adică viteza nominală), prin şuntarea excitaţiei. Pentru aceasta circuitul de excitaţie este prevăzut cu un sistem special de reglare a şuntării excitaţiei, prin care tensiunea indusului maşinii serveşte drept valoare reală iar o valoare fixă, corespunzătoare tensiunii nominale a indusului, se ia ca valoare de referinţă. Reglarea vitezei (de exemplu, ca în fig. 16.3) se menţine în limitele impuse. Dacă tensiunea indusului este mai mică ca tensiunea nominală, se menţine întreaga excitaţie. Totuşi, dacă valoarea de referinţă a vitezei creşte peste sau sub viteza de bază astfel, încît tensiunea indusului ar depăşi tensiunea nominală, atunci, prin acţiunea regulatorului de reducere a excitaţiei, excitaţia este redusă în mod automat şi viteza poate să crească fără să atragă o creştere a tensiunii indusului.

Regulatoarele funcţionează cu semnale analogice la un nivel de ieşire scăzut. La intrarea regulatorului se formează diferenţa dintre valoarea de referinţă şi valoarea reală (abaterea de reglare), din care se generează un semnal de ieşire (variabila de comandă) în concordanţă cu acţiunea regulatorului ales (regulator *P*, *I*, *PI*, *PD*, *PID*). Semnalul de ieşire al regulatorului din bucla interioară (semnalul de ieşire al regulatorului curentului din indus) trebuie considerat ca variabilă de comandă generală a întregului sistem de reglare. Întrucît această variabilă finală are un nivel foarte scăzut ea este adaptată cu ajutorul unui amplificator de putere (de exemplu un convertor cu tiristoare cu o unitate de comandă prin impulsuri) la nivelul de putere al instalaţiei care urmează.

Bucle de reglare numerice

Cînd variabila reglată trebuie să fie foarte precisă, iar valoarea reală a variabilei reglate poate fi obţinută direct sub o formă prelucrabilă prin mijloace numerice, fără

pierdere de informaţie şi fără ca aceasta să fie în detrimentul preciziei, peste sistemul de reglare analogic se suprapune o buclă suplimentară de reglare numerică (v. fig. 16.4).

De bucla numerică exterioară depinde precizia cerută. Buclele analogice aservite şi regulatoarele lor trebuie să asigure în primul rînd ca variabila reglată să aibă o variaţie în timp satisfăcătoare la o perturbaţie bruscă, cum ar fi variaţia mărimii de referinţă a sarcinei (v. capitolul despre „Optimizare"). O reglare analogică subordonată care să lucreze cît se poate de repede constituie condiţia necesară pentru o reglare globală satisfăcătoare.

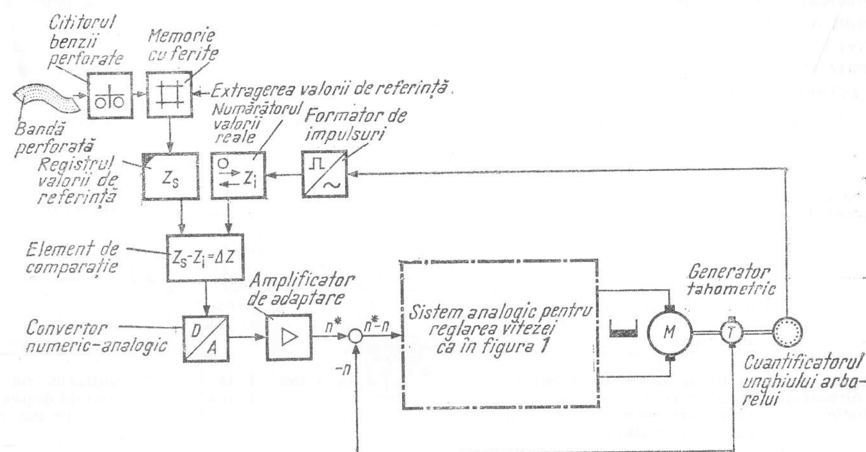


Fig. 16.4. Sistem de reglare cu bucla principală numerică, pentru reglarea distanţei sau poziţiei: Z_S — mărimea de referinţă numerică; Z_i — mărimea reală numerică; ΔZ — abaterea sub forma numerică; n^* — mărimea de referinţă analogică a vitezei; n — mărimea reală analogică a vitezei; $n^* - n$ — abaterea vitezei sub formă analogică.

Aplicaţii în acţionări

În aplicaţiile modulelor tranzistorizate în acţionările electrice, reglarea automată a maşinilor de curent continuu cu excitaţie în derivaţie este extrem de importantă. La alegerea echipamentului de forţă pentru alimentarea curentului din indus şi a excitaţiei maşinii, trebuie să se ţină seama de intervalul de lucru dorit în concordanţă cu familia de curbe viteză/cuplu şi familia corespunzătoare de curbe tensiunea indusului/curentul din indus.

În multe cazuri este suficient ca viteza şi cuplul să aibă un singur sens (de exemplu în cazul pompelor şi ventilatoarelor). Dar în acţionările reversibile care pot accelera şi frîna în ambele sensuri de rotaţie (ca de exemplu la laminoare) este deseori necesar să fie întrunit un ansamblu de condiţii; cu alte cuvinte acestea funcţionează în toate cele patru cadrane din planul viteză/cuplu.

Acționări reversibile

Întrucît cuplul mașinii de c. c. este proporțional cu produsul dintre curentul indusului și fluxului magnetic, ultimul fiind determinat de curentul de excitație, direcția cuplului dezvoltat de indusul motorului poate fi modificată fie prin inversarea curentului din indus, fie a curentului de excitație.

În cazul acționării alimentate prin convertoare electrice statice „inversarea polarității" curentului din indus și a curentului de excitație poate fi efectuată fie prin introducerea contactoarelor fie fără contacte mobile, folosindu-se circuite convertoare convenabile. Convertoarele statice simple pot să prezinte într-adevăr tensiuni de ambele polarități, dar acceptă curentul numai într-un singur sens. Pentru inversarea sensului curentului fără folosirea dispozitivelor mecanice de inversare a polilor, fiecare cale de curent trebuie să aibă un convertor propriu (convertor static reversibil). Cu aceste elemente montate în circuitul rotoric și de excitație se obțin conexiunile principale folosite în acționările reversibile, ca în tabelul 16.1.

Tabelul 16.1. Circuitele principale pentru acționări reversibile și valorile timpilor lor caracteristici

Inversarea curentului	Fără curent, cu convertor static reversibil sau Generator Ward-Leonard	Dispozitiv (comutatoare magnetice) cu inversiunea mecanică a polilor	Timpul fără cuplu (timp mort)	Timpul pentru inversarea cuplului (de la cuplul nominal)	Observații
În circuitul rotoric	Circuit de inversare a curentului rotoric, cu curent circulant		0	Circa 20 ms	
	Circuit de inversare a curentului rotoric, cu două regulatoare de curent și fără curent circulant		2 la 5 ms	40 la 50 ms	Cu unitatea de comandă dependentă de cuplu
	Circuit de inversare a curentului rotoric, cu un regulator de curent și fără curent circulant		10 la 20 ms	Circa 60 ms	
În circuitul rotoric		Comutarea circuitului rotoric	Circa 100 ms	Circa 140 ms	
	Circuit de inversare a curentului rotoric cu ajutorul unui generator Ward-Leonard		0	50 la 250 ms	Cu excitația prin convertor static
În circuitul de excitație	Circuit de inversare a excitației cu convertor reversibil		100 la 1 000 ms	300 la 2500 ms	
		Comutarea circuitului de excitație	100 la 1 000 ms	300 la 4000 ms	

Ele diferă prin cantitatea de echipament folosit, prin durata pauzei fără cuplu (timpul mort) la inversarea polarității și prin durata inversării cuplului (adică timpul necesar pentru trecerea de la cuplul nominal într-un sens de rotație la cuplul nominal în sensul opus). Aceste valori ale timpului constituie un factor determinant pentru calitatea dinamică a celor mai importante sisteme de acționare.

În fig. 16.5, este arătat un exemplu de acționare reversibilă cu dispozitiv de „comutare a circuitului rotoric" prin inversarea mecanică a polilor. Ca exemplu de acționare cu inversarea cuplului fără contacte este prezentat un circuit cu două regulatoare de curent folosit la inversarea curentului rotoric fără curent de circulație.

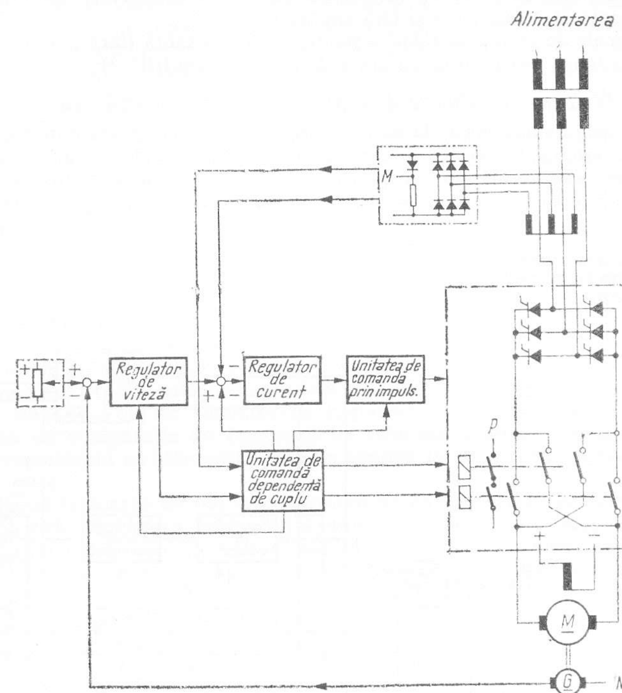


Fig. 16.5. Comutația circuitului rotoric.

În ambele exemple pentru convertoare se utilizează „o unitate de comandă dependentă de cuplu", regulatoare și unitățile de comandă prin impulsuri. Acestea comută curentul rotoric într-un sens sau altul în funcție de cuplul cerut la timpul respectiv de regulatorul de viteză, așa cum reglarea centrală și unitatea de interblocare asigură ca succesiunea operațiilor de comutare să fie corectă și foarte rapidă [1]). De exemplu cele două întreruptoare magnetice utilizate în circuitul rotoric din fig. 16.5 și convertoarele pentru cele două sensuri, din circuitul arătat în fig. 16.6 trebuie să comute simultan în toate cazurile. „Unitatea de comandă dependentă de cuplu" preia alte funcții auxiliare ca, de exemplu, limitarea tranzitorie la zero a ieșirii regulatorului de viteză și comutarea pe „unitatea de urmărire a regulatorului [2]).

1) „Unitatea de reglare dependentă de cuplu" este numerică și utilizează elementele SIMATIC.
2) Dispozitivul de urmărire a regulatorului funcționează cu semnale analogice.

„Unitatea de urmărire a regulatorului" are rolul de a „urmări" regulatorul de curent, care nu a fost acţionat şi în consecinţă nu este situat într-o buclă închisă, utilizînd tensiunea sa de ieşire (de exemplu, după tensiunea indusului sau tensiunea tahogeneratorului) astfel ca, la comutarea pe direcţia cuplului, tensiunea de ieşire a regulatorului să corespundă cel puţin în mare cu modulaţia cerută de convertor, aşa încît trecerea să poată fi efectuată fără întîrziere şi fără suprasarcini.

La sistemele de acţionare folosite pentru oprirea exactă (fără „alunecare" la viteză mică) se mai adaugă aşa-numita „unitate de reglare a opririi". [1])

Sisteme de acţionare cu buclă de reglare numerică a poziţiei sau a vitezei

La sistemele de acţionare, la care arborii sînt cuplaţi cu aşa numitul cuantificator al unghiului arborelui (fig. 16.6), valoarea reală a mărimii reglate, „unghi" sau „poziţie", se obţine direct sub formă de impulsuri, care pot fi prelucrate ulterior prin mijloace numerice. Cu ajutorul unui circuit special cu ajutorul impulsurilor poate fi obţinut simul-

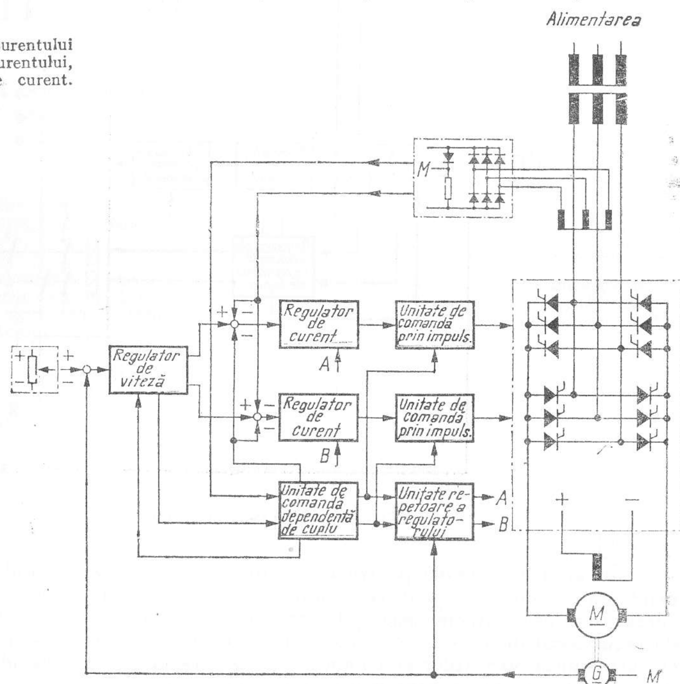


Fig. 16.6. Inversarea curentului rotoric, fără circulaţia curentului, cu două regulatoare de curent.

tan şi sensul mişcării de rotaţie (în sensul orar sau antiorar). Ţinînd seama şi de semn, numărul de impulsuri constituie măsura unghiului sau a distanţei parcurse de arbore.

În fig. 16.6 sînt arătate elementele funcţionale [2]) ale buclei numerice principale a căror variabilă reglată este distanţa sau poziţia.

1) Unitatea de reglare a opririi funcţionează numeric.
2) Aceste elemente funcţionale sînt formate din elementele SIMATIC

Impulsurile generate de cuantificatorul unghiului arborelui se aplică unui numărător de impulsuri, care determină numărul (cantitatea) şi semnul.

Ambele seturi de informaţii ajung la numărătorul valorii reale, construit sub forma unui numărător reversibil. Valoarea de referinţă a variabilei reglate, distanţă sau poziţie se introduce în registrul valorilor de referinţă sub forma unui număr, de exemplu, de la o bandă perforată. Conţinutul registrului şi al numărătorului sînt comparate într-un element de comparaţie (compararea valorii de referinţă cu valoarea reală), obţinîndu-se astfel o cifră care arată diferenţa şi semnul. Aceasta este apoi convertită într-un convertor numeric-analogic într-o valoare analogică a vitezei dorite, care se aplică regulatorului auxiliar de viteză, prin intermediul unui amplificator analogic de adaptare, care închide bucla exterioară.

Din punct de vedere al automatistului, numărătorul valorii reale, cu intrarea sa incrementală, reprezintă elementul de măsură al valorii reale a distanţei, iar amplificatorul analogic de adaptare poate fi considerat ca un regulator proporţional (regulator P) din bucla de reglare exterioară (a poziţiei). Cînd valoarea numerică reală devine egală cu valoarea de referinţă numerică (conţinutul numărătorului valorii reale devine egal cu conţinutul registrului valorii de referinţă) abaterea numerică $\Delta Z = 0$ şi, tot aşa valoarea de referinţă a buclei de reglare a vitezei $n^* = 0$, adică sistemul acţionat se opreşte.

Dacă pentru noua valoare de referinţă a distanţei sau poziţiei trebuie realizat un interval optim, *convertorul numeric-analogic* trebuie să fie neliniar.

La sistemul de reglare numerică a vitezei care este similar, frecvenţa proporţională cu viteza (valoarea reală), dată de cuantificatorul unghiului arborelui sau de generatorul tahometric de c. a., cu un formator de impulsuri conectat în serie, este comparată într-o poartă de comparaţie cu frecvenţa de referinţă impusă. Rezultă un număr de impulsuri proporţional cu diferenţa, care se adaugă la conţinutul numărătorului total, conectat în serie.

Rezultatul (valoarea totală) este convertit de un convertor numeric-analogic într-o valoare analogică, care prin intermediul unui amplificator de adaptare este folosită sub formă analogică la corecţia vitezei nominale, de către sistemul auxiliar de reglare a vitezei. Împreună cu convertorul numeric-analogic, amplificatoarele proporţionale de adaptare şi numărătorul total lucrează ca un regulator cu efect integral (regulator I), situat în bucla exterioară.

16.2.2. Module tranzistorizate pentru sistemele de reglare analogice [1])

Schemele fundamentale ale regulatoarelor cu tranzistoare

Schema fundamentală a regulatoarelor cu tranzistoare este arătată în fig. 16.7. Acest circuit cuprinde:

1. Amplificator tranzistorizat cu amplificare mare şi întîrziere foarte mică
2. Circuit de intrare pentru valoarea reală
3. Circuit de fixare a valorii de referinţă
4. Circuit de reacţie

1) Modulele tranzistorizate B, fabricate de SIEMENS, se numesc "Sistem de reglare TRANSIDYN B", „TRANSIDYN" este o marcă înregistrată în Germania, Republica Africa de Sud, Suedia şi în ţările „Convenţiei comerciale de la Madrid". „Modulul" este un element de ansamblare format din piese electrice

Comportarea statică şi dinamică a montajului arătat, este determinată aproape în exclusivitate de circuitul de reacţie şi de circuitul de intrare.

În practică, la regulatoare, reacţia se conectează deseori prin intermediul unui potenţiometru situat între ieşirea regulatorului şi potenţialul de referinţă M.

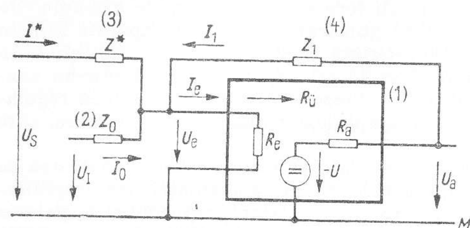


Fig. 16.7. Schema electrică de principiu a regulatoarelor SIEMENS tranzistorizate cu module B (în majoritatea cazurilor $Z^* = R^*$ şi $Z_0 = R_0$).

Prin aceasta devine posibilă o variaţie suplimentară care se foloseşte la ajustarea parametrilor caracteristici ai regulatorului [1]).

Întrucît elementele finale ale regulatorului sînt folosite deseori în instalaţiile de forţă în mod bidirecţional, amplificatoarele tranzistorizate prezintă la ieşire ambele polarităţi.

În energetică este avantajos ca semnalele de intrare în regulator să fie tensiuni, deoarece majoritatea variabilelor reglate, măsurate de indicatori de valoare reală, sînt surse de tensiune cu impedanţă internă mică şi valorile de referinţă pot fi prezentate foarte uşor sub formă de tensiuni, de exemplu cu ajutorul unor potenţiometre cuplate la surse de tensiune constantă.

Tensiunea U_I de la intrarea regulatorului reprezintă variabila reglată (valoarea reală), tensiunea U_S reprezintă intrarea de referinţă (valoarea impusă). Ambele tensiuni sînt măsurate în raport cu potenţialul de referinţă M. Tensiunile U_I şi U_S se convertesc în curenţi cu ajutorul unui circuit din canalul valorii reale (2) şi canalul valorii de referinţă (*3*). Pentru nevoile reglării trebuie formată abaterea valorii reale de la valoarea de referinţă. De aceea, tensiunile de intrare U_I şi U_S sînt introduse cu semne opuse, astfel încît în regim staţionar curenţii corespunzători se compensează în întregime sau parţial (curentul nominal de comparaţie 1 mA).

Amplificatorul dă la ieşire tensiunea U_a, care se măsoară de asemenea în raport cu potenţialul M. Din punctul de vedere al semnalelor, ea trebuie considerată ca o variabilă de comandă din sistemul de reglare automată, fără a ţine seama de elementul final conectat în serie.

Tensiunea de ieşire mai alimentează şi circuitul de reacţie (*4*), care în general este format din rezistenţe şi capacităţi. Circuitul de reacţie cuplează ieşirea amplificatorului cu intrarea acestuia şi este parcurs de curentul de reacţie I_1. Comanda reală a amplificatorului se realizează cu ajutorul curentului I_e (v. fig. 16.7). Curentul de reacţie I_1 se ia ca mărime şi semn în domeniul util al amplificatorului astfel încît compensează practic curenţii care rezultă de la toate intrările regulatorului. Acest lucru are loc cu condiţia ca consumul de putere la intrarea amplificatorului să scadă la o valoare foarte mică, practic nulă, avînd drept consecinţă faptul că toţi curenţii sînt produşi astfel, ca şi cum tensiunile ar apărea faţă de potenţialul M pe rezistenţele de intrare şi reacţie.

Deoarece circuitul de reacţie trebuie să aibă un efect regenerativ pentru ca, curba răspunsului tranzitoriu al regulatorului să prezinte forma necesară, amplificatorul (*1*) schimbă semnul tensiunii. Acest lucru este arătat prin semnul minus de la sursa in-

[1]) V. subcapitolul 14.4.

terioară de tensiune din schema circuitului echivalent al amplificatorului. Variaţia tensiunii de ieşire este astfel de sens opus cu variaţia tensiunii de intrare. Valoarea absolută a tensiunii de ieşire U_a poate să aibă în consecinţă acelaşi semn sau să fie de semn opus cu tensiunea de intrare, în funcţie de circuitul şi performanţele precedente ale tensiunii de intrare.

Punctul iniţial pentru stabilirea semnului tensiunii valorii de referinţă U_S şi a tensiunii valorii reale U_I este caracteristica şi modul de funcţionare a elementului de putere final utilizat. Dacă, de exemplu, tensiunea generată de un convertor static creşte (funcţionare de redresor) cînd tensiunea de intrare a unităţii de comandă în impulsuri asociată ajunge la valori negative mari, atunci la regulatorul de curent tensiunea valorii de referinţă U_S trebuie aplicată cu polaritatea pozitivă, iar tensiunea valorii reale U_I cu polaritate negativă ţinîndu-se seama de inversarea semnului în amplificatorul regulatorului.

La regulatorul de viteză, adăugat la regulatorul de curent, polarităţile trebuie alese cu sensuri inverse (U_S negativă, U_I pozitivă). În afară de elementele fundamentale formate din „amplificator", „circuit de intrare" şi „circuit de reacţie", regulatoarele proiectate în practică conţin adesea şi alte montaje, de exemplu „limitatorul" semnalului de ieşire al regulatorului (aceste montaje nu sînt arătate în fig. 16.7; v. fig. 16.8).

Scheme practice realizate cu ajutorul modulelor

Sistemul de module tranzistorizate, fabricate de SIEMENS, cuprinde o serie de module fundamentale şi auxiliare, compensate electric şi mecanic, care permit construirea modulară a sistemelor de reglare automată, simple sau complexe, necesare proceselor tehnologice. Prin folosirea tranzistoarelor şi diodelor cu siliciu şi a altor piese selecţionate în mod corespunzător s-a obţinut o siguranţă ridicată în funcţionare. Ieşirea amplificatoarelor tranzistorizate este aleasă la un nivel destul de ridicat, pentru ca orice perturbaţie să poată fi înlăturată prin metode simple. Fig. 16.8 prezintă o vedere generală a construcţiei modulare a regulatoarelor cu amplificatoarele de 10 mA, pentru diferite variabile reglate şi diverse aplicaţii, adică pentru diferite scheme ale canalelor valorilor reală şi impusă. Partea principală a regulatorului, în particular a regulatorului *PID* cu reacţie activă, este desenată cu linie mai groasă. La regulatoarele *P*, *I*, *PI*, *PD* sau *PID* cu reacţie pasivă, modulul *PD* suplimentar a fost omis din reacţie (v. de asemenea tabelul 16.4) [1]).

Cu ajutorul modulelor standard pentru reacţie poate fi realizat un timp de integrare de cca. 30 s. Cînd la ieşirea regulatorului este nevoie de un curent mai mare, se conectează după el în serie alte amplificatoare de putere. Pentru inversarea semnalelor se foloseşte un amplificator cu circuit de amplificare proporţională 1 : 1 (de exemplu pentru regulatoarele cu două ieşiri în opoziţie).

În afară de amplificatorul regulatorului de 10 mA, sistemul modular conţine şi alte amplificatoare de comandă cu curenţi de ieşire între 5mA şi 2mA. Amplificatorul de comandă de 5 mA este construit cu un „modul combinat" cu capetele libere la care se pot fixa prin lipire piese pentru orice circuit de intrare sau reacţie dorit (amplificatorul şi circuitul combinate într-un singur ansamblu). Modulele pentru surse de alimentare conectate la reţea trifazată sau monofazată servesc la alimentarea modulelor *B* active, cu o tensiune c.c. de ± 24 V.

[1]) Notaţiile prescurtate au următoarea semnificaţie: *P* — regulator proporţional; *I* — regulator integral; *D* — componentă derivativă; *PI* — regulator cu efect proporţional şi integral; *PD* — regulator cu efect proporţional şi derivativ; *PID* — regulator cu efect proporţional, integral şi derivativ.

Circuitul de intrare al regulatorului (intrarea pentru valoarea de referință și valoarea reală)

Potențiometru pentru valoarea de referință

Generator de funcție rampă

+24V -24V -10V +10V K M H V R

Valoarea de referință ∓10V, 1mA

Sincrogenerator De

Regulator principal

Circuite generale de intrare

Transformator de curent

Potențiometru pentru valoarea de referință

G

Șunt de măsură GI mV= V=

Generator c.c. GU V= V=

Generator tahometric Dr

Valoarea reală ±10V, 1mA

Spre intrarea amplificatorului regulatorului

Mărimi neelectrice T G Modulator

Circuite de intrare în amplificatorul de curent

Regulator principal

Valoarea de referință +10V, 1mA

SE

Transformator de curent

Șunt de măsură GI mV= V=

Valoarea reală -10V, 1mA

Potențiometru pentru valoarea reală a curentului

Circuit de intrare pentru regulatorul de accelerație

Valoarea de referință pentru accelerație

Generator tahometric

Valoarea reală a vitezei

Bs

Alte circuite de intrare

Valoarea de referință

Valoarea reală

L

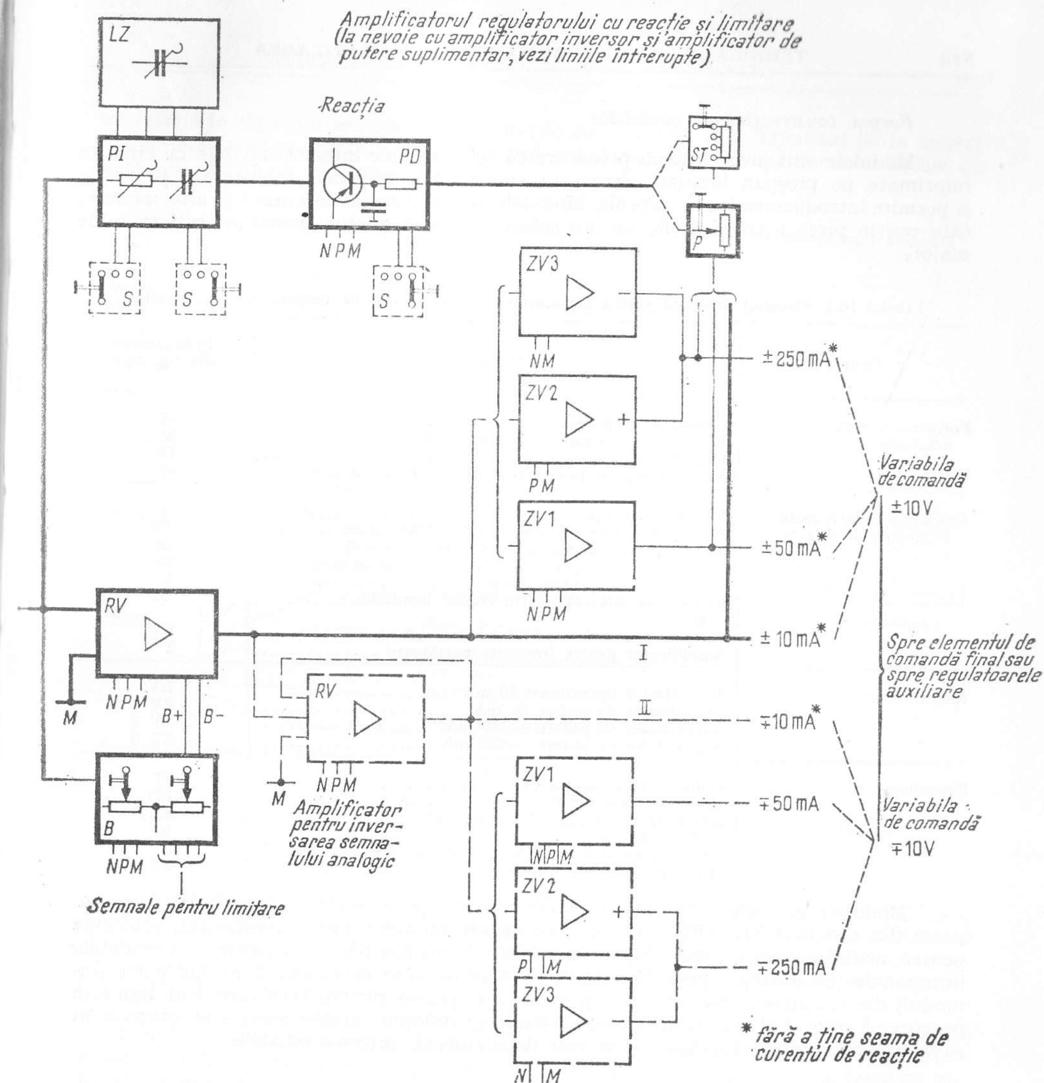


Fig. 16.8. Schema regulatoarelor analogice formate din module B SIEMENS, cu amplificator tranzistorizat de 10 mA (pentru prescurtări v. tabelul 16.2).

I – Ieșirea reacției negative;

II – Ieșirea reacției pozitive.

Forma constructivă a modulelor

Modulele sînt proiectate cu precădere ca subansamble interschimbabile cu circuite imprimate pe preşpan laminat. Structura compactă le imprimă robusteţe şi protecţie şi permite introducerea lor în capsule. Modulele pentru sursele de curent şi alte module, care conţin piese mari şi grele, au un schelet metalic şi sînt denumite subansamble majore.

Tabelul 16.2. **Circuitul principal pentru acţionări reversibile şi valorile timpilor lor caracteristici**

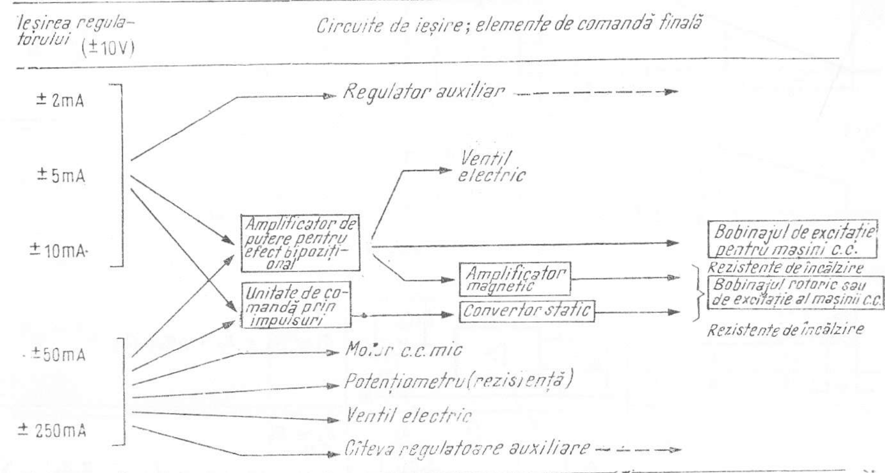
Grup	Module	Prescurtarea din fig. 16.8
Formarea valorii nominale	Alimentarea cu tensiune constantă Element de ajustare cu motor Demodulator Modul de intrare pentru generatorul de funcţie rampă	K M De H
Evaluarea valorii reale şi module de intrare	Modul de filtrare Modul de intrare pentru regulatorul de curent Modul de intrare pentru regulatorul de viteză Modul de intrare pentru regulatorul de acceleraţie Fişa cu prizele pentru lipituri Element de măsură pentru curent continuu şi tensiune continuă Amplificator pentru frecvenţa purtătoare	G SE Dr Bs L GI GU T
Amplificator	Amplificator operaţional 10 mA Amplificator de putere 50 mA Amplificator de putere + 250 mA Amplificator de putere −250 mA	RV ZV 1 ZV 2 ZV 3
Conexiuni	Modul pentru reacţia PI Modul suplimentar P Adaus capacitiv Modul limitator Modul comutator Modul divizor de tensiune	PI PD LZ B S ST

Modulele se fixează în elementele de suport (şasie, sertare şi dulapuri) care fac parte din sistemul SIEMENS, ele sînt un sistem modular, compartiementat, proiectat pentru utilizarea convenabilă în automatizări. Instrumentele indicatoare şi elementele funcţionale (de exemplu potenţiometrele în măsură, care deocamdată nu fac parte din modul) din circuitul regulatorului respectiv, ca şi prizele pentru verificare, sînt montate pe panoul frontal al şasiurilor. Pentru sertare şi dulapuri aceste piese sînt grupate în subansamblele plăcii frontale, care sînt de asemenea interschimbabile.

Elemente de comandă finală

Deoarece amplificatoarele tranzistorizate lucrează cu o putere de ieşire foarte mică, în serie cu regulatoarele buclelor interioare trebuie conectate amplificatoare speciale, de putere, pentru a face faţă la comanda maşinilor de putere etc. În tabelul 16.3 se prezintă o situaţie generală a celor mai importante posibilităţi, care se obţin prin folosirea regulatoarelor cu module. Amplificatoarele bipoziţionale ale sistemului modular prezintă două ieşiri de c.c., comutate periodic pe sensuri fixe ale curentului şi tensiunii. Fixarea valorilor medii impuse tensiunii şi curentului se realizează printr-o modulaţie în lăţime a impulsurilor. Unităţile de comandă prin impulsuri de la convertoarele statice sînt construite de asemenea sub formă de module interschimbabile din sistemul „electronic de putere".

Tabelul 16.3. **Circuite de ieşire ale regulatoarelor cu module B SIEMENS tranzistorizate; elemente de comandă finale**



16.2.3. Schemele amplificatoarelor de reglare; caracteristicile regulatoarelor automate

Pentru a imprima regulatorului format din module efectul dorit (regulator *P*, *I*, *PI*, *PD* sau *PID*), amplificatorul său trebuie să aibă un circuit de reacţie şi intrare cu totul specific. În tabelul 16.4 sînt trecute montajele cele mai importante, cu formulele asociate pentru funcţia de transfer, funcţia indicială şi mărimile caracteristice ale regulatoarelor şi elementelor de filtrare.

Funcţia de transfer şi funcţia indicială (v. subcapitolul 14.2) sînt echivalente din punct de vedere matematic. Întrucît considerentele suplimentare (de exemplu optimizarea) se fac în principiu cu ajutorul formulelor funcţiei de transfer, în tabel au fost trecute numai acestea.

Formulele funcţiilor de transfer

La un circuit electronic de amplificare ca cel din fig. 16.8 curba variaţiei tensiunii de ieşire, la o anumită variaţie a tensiunii de intrare, de orice formă cu condiţia să fie limitată în amplitudine, este dată de ecuaţia

$$-U_a(p) = P_R(p)\ U_E(p).$$

Tabelul 16.4. Scheme de amplificatoare operaţionale. Funcţia de transfer, **răspunsul indicial şi parametrii de acordare ai regulatoarelor**

...iunea ...gu- ...rului	Funcţia treaptă	Schema de principiu (fără potenţiometru de reacţie)	Circuitul de intrare şi de reacţie	Funcţia de transfer	Amplificarea proporţională [1])	Constanta de timp [1])
			$Z_0 = R_0$ $Z_1 = R_1$	$F_R = V_R$	$V_R = \frac{R_1}{R_0}$	—
			$Z_0 = R_0$ $Z_1 = \frac{1}{pC_1}$	$F_R = \frac{1}{p\tau_0}$	—	$\tau_0 = R_0C_1$
			$Z_0 = R_0$ $Z_1 = R_1 + \frac{1}{pC_1}$	$F_R = V_R \frac{1 + p\tau_1}{p\tau_1}$	$V_R = \frac{R_1}{R_0}$	$\tau_1 = R_1C_1 = V_R\tau_0$ $\tau_0 = R_0C_1$
			$Z_0 = R_0$ $Z_1 = R_1 + R_2 + pR_1R_2C_2$	$F_R = V_R \frac{1 + p\tau_2}{1 + p\tau^*}$	$V_R = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$	$\tau_2 = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} C_2$ $\tau^* = \frac{R_1 + R_2}{R_{ü}} \left(1 + \frac{R_0}{R_0} + \frac{R_0}{R_1}\right) \tau_2$
...u ...ţie ...ivă [2])			$Z_0 = R_0$ Z_1[4]) $= \frac{[1+p(R_1+R_2)C_1]\left(1+p\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}C_2\right)}{pC_1}$	$F_R = V_R \frac{(1+p\tau_1)(1+\tau_2)^{5)}}{p\tau_1}$	$V_R = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$	$\tau_1 = (R_1 + R_2)\,C_1$ $\tau_2 = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} C_2$ $\tau_0 = R_0C_1$
...u ...ţie ...ivă			$Z_0 = R_0$ $Z_1 = \frac{(1 + pR_1C_1)\,(1 + pR_2C_2)}{pC_1}$		$V_R = \frac{R_1}{R_0}$	$\tau_1 = R_1C_1$ $\tau_2 = R_2C_2$ $\tau_0 = R_0C_1$
...v [3]) ...u ...ru			$Z_0 = R_0$ $Z_1 = \frac{R_1}{1 + pR_1C_1}$	$F_R = \frac{V_R}{1 + pt_g}$	$V_R = \frac{R_1}{R_0}$	$t_g = R_1C_1$
...v			$Z_0 = R_{01} + R_{02} + pR_{01}IR_{02}C_0$ $Z_1 = R_1$		$V_R = \frac{R_1}{R_{01} + R_{02}}$	$t_g = \frac{R_{01}R_{02}}{R_{01} + R_{02}} C_0$

[1]) V. la pag. 844 influenţa potenţiometrului de reacţie;
[2]) În legătură cu aceasta v. pag. 855;
[3]) În legătură cu aceasta v. pag. 856;
[4]) Aproximativ.
[5]) În cazul regulatorului *PID* cu reacţie pasivă constanta de timp $\tau_{21} = R_2C_1$ se neglijează.

$U_a(p)$ şi $U_E(p)$ sînt transformatele Laplace ale funcţiilor de timp ale tensiunii de ieşire şi intrare, p se numeşte „operator Laplace" (v. p. 168) $U_E(p)$ ţine loc de $U_I(p)$ sau $U_S(p)$, după caz, ca în fig. 16.7. Se presupune, că semnalele amplificatoarelor sînt mici (astfel încît nici o parte a amplificatorului nu ajunge la saturaţie), iar circuitul este în întregime liniar.

Raportul complex:

$$F_R(p) = \frac{U_a(p)}{U_E(p)}$$

descrie acţiunea dinamică a regulatorului

Cu $p = j\omega$ ($\omega = 2\pi f$, pulsaţia), $F_R(p)$ reprezintă funcţia de transfer a regulatorului la tensiuni de intrare şi ieşire uniforme sinusoidale (frecvenţa parametrică). Funcţia de transfer poate fi dedusă şi din regulile de calcul în complex pentru c.a.

Pornind de la un amplificator de reglare ideal, cu caracteristicile:

Rezistenţa de ieşire $R_a = 0$.

Rezistenţa de transfer $R_t = \infty$.

Raportul dintre rezistenţa de intrare şi rezistenţa de transfer $R_e/R_t = 0$.

Se poate obţine următoarea ecuaţie simplă pentru funcţia de transfer a regulatorului automat (unde parametrul p sau $j\omega$ se omite pentru simplificarea scrisului):

$$F_R = \frac{Z_1}{Z_0},$$

Z_1 fiind impedanţa de reacţie, iar Z_0 impedanţa de intrare pe canalul valorii reale (fig. 16.9).

Ca Z_0 trebuie luată întotdeauna impedanţa din canalul valorii reale, deoarece sistemul de reglare automată se închide întotdeauna prin el, iar caracteristicile reglării dinamice trebuie considerate în buclă închisă.

La cazurile obişnuite impedanţele Z_0 şi Z_1 trebuie determinate din următoarea ecuaţie (reprezentarea cuadripolară, v. şi fig. 16.9):

$$Z_0 \text{ sau } Z_1 = Z_\alpha + Z_\beta + \frac{Z_\alpha Z_\beta}{Z_\gamma}$$

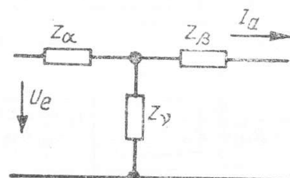


Fig. 16.9. Reprezentarea circuitului general de intrare şi reacţie sub formă de cuadripol.

În cazuri speciale, trebuie luate în considerare caracteristicile amplificatorului regulatorului, care nu sînt chiar ideale. Aceasta înseamnă că trebuie să se ţină seama de valorile reale ale R_e, R_a şi R_t. În acest caz pentru funcţia de transfer a regulatorului rezultă o expresie mai complicată. Cu expresiile complexe pentru Z_0 şi Z_1 se obţine următoarea formulă a funcţiei de transfer a regulatorului *PID*:

$$F_R + V_R\left(\frac{1}{p\tau_1} + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1} + p\tau_2\right)$$

τ_1 şi τ_2 sînt constantele de timp (parametrii de acordare), iar V_R este factorul de amplificare proporţională al regulatorului.

Cu $\tau_1 \gg \tau_2$ expresia se poate scrie aproximativ sub forma

$$F_R = V_R\left(\frac{1}{p\tau_1} + 1 + p\tau_2\right).$$

Aceasta corespunde cu conectarea în paralel a celor trei membri ai transmisiei cu funcţiile de transfer:

$F_{R_1} = \dfrac{1}{p\dfrac{\tau_1}{V_R}}$,	$F_{R_2} = V_R$	$F_{R_3} = pV_R\tau_2$
Componenta integrală	Componenta proporţională	Componenta derivativă

Semnalele de ieşire ale acestor componente se adună. Din funcţia de transfer a regulatorului *PID* se pot deduce următoarele formule pentru regulatoarele mai simple; cu

$\tau_2 = 0$ şi $\tau_1 = \infty$	rezultă regulatoarele *P*,
$\tau_2 = 0$	rezultă regulatoarele *PI*,
$\tau_1 = \infty$	rezultă regulatoarele *PD*,
$\tau_2 = 0$ şi componenta *P* nulă,	rezultă regulatoarele *I*.

Legătura dintre constantele de timp τ_1 şi τ_2 şi factorul de amplificare proporţional V_R pe de o parte şi valorile *R* şi *C* ale circuitului pe de altă parte poate fi văzută în tabelul 16.4.

Aceste funcţii de transfer ale regulatorului *PID* se scriu adesea în literatură sub forma:

$$F_R = V_R\left(\frac{1}{pT_n} + 1 + pT_v\right),$$

sau

$F_R = K_D + \dfrac{K_I}{p} + pK_D$, semnificaţia diverselor valori caracteristice fiind următoarea:

$K_p = V_R$ factor de amplificare proporţională

$\tau_1 = V_R \cdot \tau_0 = K_p/K_I = T_n$ timpul reglării efectului de integrare
$\tau_2 = K_D/K_p = T_v$ timpul efectului de derivare.

Un alt timp caracteristic se notează cu

$\tau_v = \tau_1/V_R = 1/K_I$ timpul de integrare.

Explicaţiile referitoare la parametrii caracteristici ai regulatorului[1])

Factorul de amplificare proporţională V_R al regulatorului P arată în orice moment raportul dintre tensiunea de intrare şi tensiunea de ieşire.

Factorul de amplificare proporţională V_R al regulatorului PI dă valoarea variaţiei tensiunii de ieşire, la care ajunge brusc tensiunea de ieşire cînd la intrare se aplică o variaţie a tensiunii în formă de treaptă.

Timpul efectului de integrare $T_n = \tau_1$ al regulatorului PI arată timpul în care tensiunea de ieşire creşte de la nivelul său iniţial la valoarea dublă, cînd la intrare se aplică o variaţie de tensiune în formă de treaptă, sau timpul în care un regulator I trebuie să integreze pentru a ajunge la valoarea saltului iniţial.

Timpul de integrare $\tau_v = \tau_1/V_R$ al regulatorului PI indică timpul în care, în urma aplicării unei trepte a tensiunii de intrare, tensiunea de ieşire creşte, după saltul său iniţial proporţional, pentru ca să ajungă la valoarea tensiunii de intrare, datorită efectului de integrare al regulatorului.

Timpul de integrare $\tau_0 = \tau_1/V_R$ al regulatorului I este timpul în care tensiunea de ieşire creşte la valoarea saltului tensiunii de intrare.

Timpul efectului de derivare $T_v = \tau_2$ al regulatorului PD sau PID este un factor determinant pentru valoarea răspunsului indicial al tensiunii de ieşire a regulatorului în planul tensiune-timp (impuls de derivare, impuls diferenţial).

Constanta de timp parazită a regulatorului *PD*

Regulatorul PD este construit cu reacţie pasivă (circuit T, v. tabelul 16.4).

Un răspuns indicial sub forma unui impuls de derivare, infinit înalt şi infinit îngust, poate fi produs de un amplificator de reglare ideal cu rezistenţa de transfer $R_t = \infty$, în condiţii ideale.

Funcţia de transfer corespunzătoare este:

$$F_R = V_R\,(1 + p\tau_2),$$

cu

$$V_R = \frac{R_1 + R_2}{R_0} \quad \text{şi} \quad \tau_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}\,C_2\,.$$

În realitate însă, deoarece R_t are o valoare finită, rezultă un răspuns indicial de formă exponenţială descrescătoare:

$$F_R = V_R\,\frac{1 + p\tau_2}{1 + p\tau^*}$$

1) V. diagramele răspunsurilor indiciale din tabelul 16.4.

unde

$$\tau^* = \frac{R_1 + R_2}{R_t}\left(1 + \frac{R_e}{R_0} + \frac{R_e}{R_1}\right)\tau_2.$$

Ultima valoare iniţială a răspunsului indicial este:

$$U_{am} = U_E\,\frac{R_t R_1}{R_0 R_1 + (R_0 + R_1) R_e}\,.$$

τ^* este constanta de timp parazită. Ea constituie un factor determinant pentru lăţimea părţii iniţiale, exponenţial descrescătoare a răspunsului indicial. La o intensitate a impulsului dată cu cît impulsul derivativ este mai larg, cu atît amplitudinea iniţială este mai mică (determinată de $T_v = \tau_2$).

Cu ajutorul regulatorului PD, o întîrziere în sistemul de reglare poate fi teoretic compensată prin efectul derivativ, după o ajustare corespunzătoare a regulatorului, astfel încît acesta să aibă o comportare pur proporţională. Datorită faptului că R_t are o valoare reală finită, constanta de timp parazită rămîne ca o constantă de timp reziduală.

Regulatorul *PID* cu reacţie pasivă sau activă

Regulatorul PID poate fi realizat cu reacţie activă sau pasivă (v. circuitele funda mentale din tabelul 16.4). Reacţia cuprinde un circuit serie, cu o componentă de întîrziere şi o componentă derivativă; în cazul reacţiei active se conectează între ele un amplificator de putere (tranzistorizat).

O comparaţie a funcţiilor de transfer mai importante arata că, cu ajutorul reacţiei pasive, în afara constantelor de timp necesare τ_1 şi τ_2 se realizează şi constanta de timp a cuplajului τ'_{21}. Dacă aceasta se neglijează, se obţin funcţii de transfer echivalente pentru ambele circuite. Între parametrii caracteristici ai componentelor P, I şi D ale regulatoarelor PID există anumite relaţii. Efectul lor este astfel, încît valorile particulare τ_1 şi τ_2 nu pot fi fixate de loc (v. fig. 16.10) şi, în anumite circumstanţe, parametrii de acordare reali nu diferă prea mult de valorile fixate. Aici se face referire la bibliografia de specialitate. Făcînd aceste observaţii, se presupune că diversele componente ale reacţiei sînt conectate între ele fără interacţiune. Această condiţie se realizează numai în cazul reacţiei active. La reacţie pasivă există o influenţă reciprocă, datorită cuplajului energetic al elementelor acumulatoare de energie, întrucît condensatorul C_1 primeşte energie de la C_2.

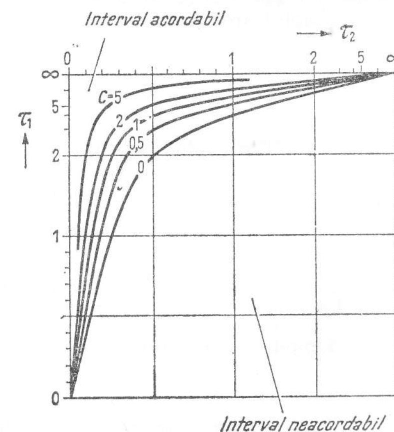


Fig. 16.10. Intervalul de acordare pentru timpul de derivare τ_1 şi timpul de integrare τ_2, la un regulator PID cu reacţie pasivă (aceeaşi scară de timp pentru τ_1 şi τ_2).

Constanta de timp τ'_{21} este dată de următoarea ecuaţie în funcţie de constanta de timp τ_2,

$$\tau'_{21} = R_2C_1 = R_2C_2 \frac{C_1}{C_2} = c\tau_2$$

unde

$$c = C_1/C_2.$$

Din această cauză c este un factor determinant în ceea ce priveşte efectul interacţiunii; $c = 0$ reprezintă un cuplaj fără interacţiune. Cu ajutorul unor expresii matematice care nu se dau aici, se poate trasa sistemul de curbe din fig. 16.10. Din acesta se poate vedea că pe măsură ce interacţiunea creşte, intervalul ajustabil se reduce foarte mult.

Amplificatorul *P* cu filtrare activă

La amplificatorul *P* cu „filtrare activă" circuitul *RC* din reacţie (v. tabelul 16 4) face ca la timpul $t = 0$ să apară o mică treaptă (iniţială) proporţională în răspunsul indicial, dacă se utilizează un potenţiometru (v. § 16.2.4). În conformitate cu aceasta, în formula funcţiei de transfer apare un termen suplimentar.

Factorii de corecţie ai parametrilor de acordare

Cînd la ieşirea regulatorului se foloseşte un potenţiometru de reacţie, valorile parametrilor de acordare diferă de valorile fundamentale, dacă reacţia este conectată direct la ieşirea regulatorului.

Amplificarea proporţională:

$$V_{R\alpha} = V_R \frac{1 + (\alpha - \alpha^2)\beta_1}{\alpha}.$$

Timpul efectului de integrare

$$\tau_{1\alpha} = \tau_1[1 + (\alpha - \alpha^2)\beta_1].$$

Timpul efectului de derivare

$$\tau_{2\alpha} = \tau_2 \frac{1 + (\alpha - \alpha^2)\beta_2}{1 + (\alpha - \alpha^2)\beta_1}.$$

Timpul de integrare

$$\tau_{0\alpha} = \tau_0\alpha.$$

Amplificarea proporţională a „filtrului activ" la timpul $t = 0$:

$$V_{R0} = V_R(1 - \alpha)\beta_1 = V_{R\alpha} - \frac{V_R}{\alpha}.$$

Semnificaţia termenilor folosiţi este următoarea:

αU_a — tensiunea de pe priza, proporţională cu tensiunea de ieşire U_a ($\alpha = 0 \ldots 1$).

R_q — rezistenţa de fugă la ieşirea regulatorului (potenţiometrul, inclusiv rezistenţa reziduală fixă).

$\beta_1 = R_q/R_1$ sau $R_q/(R_1 + R_2)$,
$\beta_2 = R_q/R_2$.

16.2.4. Optimizarea

Prin „optimizarea echipamentului de reglare", se înţelege sarcina de a selecta regulatorul cel mai potrivit (cu acţiune specifică *P*, *I*, *PI*, *PD*, *PID*) şi de a acorda parametrii săi astfel încît, la influenţele exercitate din afară (de exemplu variaţia mărimii de referinţă) asupra sistemului, răspunsul tranzitoriu al sistemului (variaţia variabilei reglate) să fie „optim". În strînsă legătură cu acesta se face alegerea şi aplicarea celui mai potrivit procedeu de optimizare. Pentru definiţia noţiunii de „optim" se pot lua numeroase aspecte funcţionale, economice şi cele care se referă la dinamica reglării.

Din teorie şi practică se cunosc mai multe procedee de optimizare, ce se referă însă numai la cîteva criterii individuale, de seamă şi deci foarte specifice, care în consecinţă permit o acordare mai mult sau mai puţin corespunzătoare a regulatorului.

Pentru optimizare, în general ca punct de plecare pentru funcţia reglării se ia o treaptă ideală a mărimii de referinţă, întrucît aceasta reprezintă de fapt un test foarte critic şi deoarece dă o imagine clară despre comportarea tranzitorie a variabilei reglate. Aceasta poate fi luată foarte uşor ca un semnal de verificare practică. În fig. 16.11 se arată variaţia variabilei reglate la o variaţie treaptă a mărimii de intrare pentru

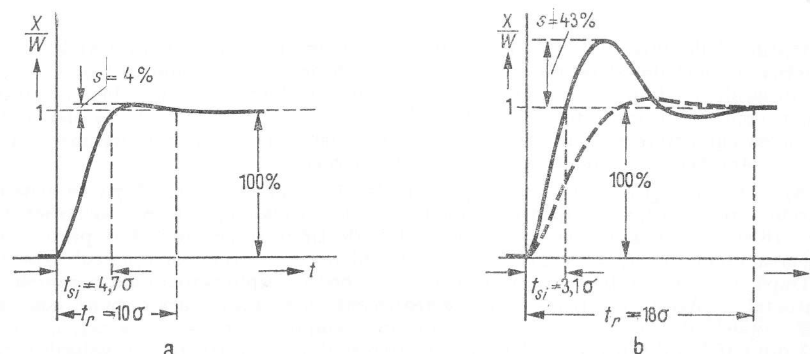


Fig. 16.11. Răspunsul indicial al variabilei reglate la o treaptă unitară a mărimii de referinţă (abatere tranzitorie, deoarece se admite că elementul de execuţie este cu acţiune integrală): *a* — acordare optimă după criteriul modulului; *b* — acordare optimă după criteriul simetric; —— fără filtrarea mărimii de referinţă; ----- cu filtrarea mărimii de referinţă; t_{si} — timpul de primă stabilire; t_r — timpul de răspuns; *s* — suprareglarea.

două acordări diferite ale regulatorului (*a* — acord după criteriul de acordare optimă al modulului; *b* — acord după criteriul simetric de acordare optimă. In exploatare interesează adesea şi comportarea tranzitorie a variabilei reglate la perturbaţii de exemplu la variaţii ale sarcinii. În fig. 16.12 este arătată variaţia mărimii reglate la o anumită variaţie treaptă a sarcinii.

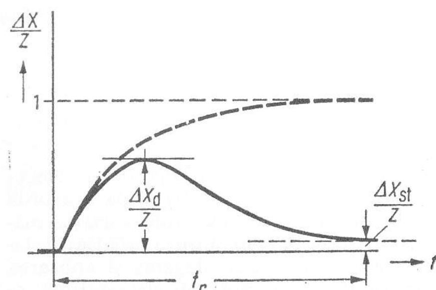


Fig. 16.12. Răspunsul tranzitoriu al mărimii reglate la variaţia sarcinii în formă de treaptă.
---- fără reglare automată;
—— cu reglare automată;
$\frac{\Delta X_d}{Z}$ — eroarea dinamică (tranzitorie);
$\frac{\Delta X_{st}}{Z}$ — eroarea staţionară (permanentă) cînd se utilizează un regulator fără efect integral.

Suprareglarea *s* indică mărimea primei (celei mai mari) depăşiri a variabilei reglate, peste noua valoare staţionară a mărimii de intrare, raportată la variaţia mărimii de referinţă. La multe sisteme practice de reglare automată, de exemplu în acţionări, în general o depăşire mică este admisibilă. În cazurile speciale cînd depăşirile nu sînt admise de fel, acordarea regulatorului trebuie făcută, de exemplu, conform „optimumului liniar". Abaterea dinamică la perturbaţii de sarcină se raportează la variaţia (staţionară) care ar avea loc dacă regulatorul n-ar funcţiona.

Criteriul modulului şi criteriul simetric

Optimizările după „criteriul modulului" şi „criteriul simetric" s-au dovedit eficace în practica acţionărilor şi energetică. Ele se bazează pe criterii dinamice teoretice şi se aplică deosebit de simplu. Cu ajutorul cîtorva tabele şi formule simple, în majoritatea cazurilor, construcţia regulatorului poate fi determinată chiar la proiectarea sistemului, fără a avea cunoştinţe speciale de teorie dinamică, iar la punerea în funcţiune a sistemului nu sînt necesare calcule sau diagrame laborioase.

Aplicarea practică a acestor metode are loc în felul următor: după ce sistemul care trebuie reglat a fost analizat din punct de vedere dinamic, şi forma sa structurală (v. fig. 16.8) este cunoscută cu toate constantele de timp, se procedează în primul rînd la alegerea regulatorului adecvat şi a procedeului de optimizare cu ajutorul tabelului 16.5. După aceea din tabel se iau valorile de acord corespunzătoare ale parametrilor regulatoarelor. (Aceste valori de acord se realizează cu ajutorul unor circuite convenabile pe canalele de reacţie şi de intrare ale unui amplificator tranzistorizat, aşa cum rezultă din § 16.2.3 şi tabelul 16.4.) În tabelul 16.6 se dau în acelaşi timp şi valorile caracteristice ale răspunsului tranzitoriu corespunzător variaţiilor treaptă a mărimii de intrare.

În fig. 16.11 este reprezentată variaţia variabilei reglate la variaţia treaptă aplicată la intrarea unui sistem de reglare automată, acordat după criteriul modulului (*a*) şi după criteriul simetric (*b*).

Tabelul 16.5. Alegerea regulatorului şi a criteriului de acordare optimă în funcţie de constantele de timp ale sistemului reglat

Nr.	Partea reglată						Acţiunea regulatorului[2])	Criteriul de acordare optimă[3])	Constanta de timp a filtrului pentru mărimea de referinţă t_{gs}
	Constante de timp principale			Constante de timp parazite[1])					
	T_0	T_1	T_2	$4\sigma \geqslant T$	$4\sigma \leqslant T$	$4\sigma \ll T$			
1				×	×	×	*I*	BO	—
2a		×		×			*PI*	BO (SO)	—
2b		×			×		*PI*	SO (BO)	$0 \leqq t_{gs} \leqq 4\sigma$ [4])
2c		×				×	*P (PI)*	BO (SO)	(4σ)
3a		×	×	×			*PID*	BO (SO)	—
3b		×	×		×		*PID*	SO (BO)	$0 \leqq t_{gs} \leqq 4\sigma$ [4])
3c		×	×			×	*PD (PID)*	BO (SO)	(4σ)
4a	×			×			*PI*	SO	4σ
4b	×				×		*PI*	SO	4σ
4c	×					×	*P (PI)*	BO (SO)	(4σ)
5a	×		×	×			*PID*	SO	4σ
5b	×		×		×		*PID*	SO	4σ
5c	×		×			×	*PD (PID)*	BO (SO)	(4σ)

× — Constanta de timp sau raportul constantei de timp existente.
T_0 — Timpul de integrare al unităţii integrale.
T_1 — Constanta de timp cea mai mare.
T_2 — A doua constantă de timp (ca mărime).
σ — Suma constantelor de timp parazite.
BO — Criteriul modulului.
SO — Criteriul simetriei.

[1]) Cuadruplul sumei constantelor de timp parazite se raportează la constanta de timp cea mai mate T_1 sau la T_0 în cazul cînd T_0 există.
[2]) Acţiunea regulatorului dată în paranteză este folosită, în cazul deviaţiei remanente staţionare prea mari, pentru regulatoarele *P* sau *PD*.
[3]) Criteriul de acordare optimă dat în paranteze asigura o reglare lentă.
[4]) Pentru determinarea filtrului optim pentru valoarea nominală, v. fig. 16.3.

În primul caz are loc o mică suprareglare a variabilei reglate (suprareglarea $s = 4\%$); în cazul al doilea variaţia variabilei reglate prezintă o suprareglare mare ($s = 43\%$, curba groasă), dar timpul de primă stabilire t_{s1} este mai mic decît la acordul făcut după optimul modulului. Pentru a împiedica suprareglări mari, regulatoarele acordate după criteriul simetric primesc pe canalul mărimii de intrare o „filtrare" suplimentară (o reţea integrală de ordinul întîi), a cărei dimensionare este dată în ultima coloană din tabelul 16.5, asterisc 4. Cel mai favorabil răspuns indicial al mărimii de reglare la o variaţie treaptă a mărimii de referinţă este reprezentat prin linie punctată, în fig. 16.11, *b*.

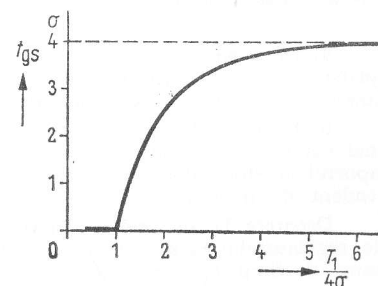


Fig. 16.13. Filtrarea cea mai favorabilă a mărimii de referinţă pentru sistemele de reglare optimizate după criteriul simetric în proces fără componentă integrală.

Dacă trebuie luată o hotărîre între alegerea optimizării după criteriul modulului sau după criteriul simetric, următoarele avantaje ale optimizării simetrice pot fi importante:

Tabelul 16.6. **Valorile parametrilor de acordare ai regulatorului, valorile caracteristice ale răspunsului indicial şi constanta de timp echivalentă a sistemului**

Criteriul de optimizare	Acţiunea regulatorului	Valorile parametrilor de acordare ai regulatorului				Valorile caracteristice ale răspunsului indicial la un salt al mărimii de referinţă			Constanta de timp echivalentă t_e
		τ_0	τ_1	τ_2	V_R	t_{s1}	v	s	
BO	I	$2V_S\sigma$	—	—	—	4,7 σ la 3,8σ 1)	8,4	4,3%	2σ
	PI		T_1	—	$\frac{T_1}{2V_S\sigma}$				
	PID			T_2					
	PD	—	—						
	P	—	—						
Fără integrator SO	PI	$\frac{8V_S\sigma^2}{T_1}$	4σ	—	$\frac{T_1}{2V_S\sigma}$	3,1σ la 4,7σ 4)	8,4σ la 16,5σ 4)	4,3% la 43,4% 4)	—
	PID			T_2		4,7σ la 7,6σ	8,4σ la 13,3σ	4,3% la 8,1%	2σ la 4σ
cu integrator	PI	$\frac{8V_S\sigma^2}{T_0}$ 3)		—	$\frac{T_0}{2V_S\sigma}$ 3)	3,1σ 5)	16,5 σ 5)	43,4% 5)	—
	PID			T_2		7,6σ	13,3 σ	8,1%	4σ

Observaţii: Notaţiile folosite sînt explicate în tabelul 16.5.

1) Timpul de primă stabilire t_{s1} este 4,7, dacă σ conţine numai o singură constantă de timp; el se reduce la 3,8 σ, dacă σ este formată dintr-un număr infinit de constante de timp (σ = suma constantelor de timp).

2) Se poate scrie în acest caz şi $8\delta^2/T_1$ (v. pag. 861).

3) T_0 apare în loc de T_1. Se mai poate scrie şi $T_i/2\sigma$ (v. pag. 8-9).

4) Valorile din rîndul de sus sînt valabile pentru treptele mărimii de referinţă nefiltrată; cele din rîndul de jos pentru treptele mărimii de referinţă filtrată.

În ambele cazuri valorile pentru criteriul modulului sînt cu atît mai apropiate, cu cît raportul $T_1/4\sigma$ se apropie mai mult de 1.

5) Valorile din rîndul de sus sînt valabile pentru treptele mărimii de referinţă nefiltrată; valorile din rîndul de jos pentru treptele mărimii de referinţă filtrată ($t_g = 4\sigma$).

6) Parametrii de acordare şi valorile date în acest caz rămîn numai aproximative dacă se foloseşte criteriul de acordare simetric. În majoritatea cazurilor V_R este ceva mai mare, iar τ_1 ceva mai lent.

a) Dacă $4\sigma < T$, efectele perturbaţiilor se înlătură mai repede cu regulatoarele optimizate după criteriul simetric, decît după criteriul modulului. De aceea optimizarea simetrică se preferă la sistemele de reglare supuse în special la perturbaţii.

b) La maşinile c.c saturaţia magnetică are în intervalul de funcţionare, efectul unei variaţii echivalente a constantei de timp a excitaţiei şi a amplificării. De aceea raportul acestor valori caracteristice rămîne mai mult sau mai puţin constant, independent de punctul de funcţionare real.

Deoarece la sistemele optimizate după criteriul modulului constantele de timp ale regulatorului τ_0 şi τ_1 sînt determinate de amplificarea V_s a instalaţiei sau de constanta de timp T_1 a instalaţiei, adaptarea poate fi realizată aici numai într-un singur punct de funcţionare de pe curba de magnetizare.

În cazul regulatoarelor optimizate simetric, însă τ_0 (ca şi V_R) este determinat de raportul T_1/V_s, iar valoarea σ care nu depinde de saturaţie, astfel încît acordul realizat într-un punct de funcţionare este corect pentru întregul interval de lucru.

La sistemele cu o componentă integrală (timpul de integrare T_0), optimizarea unui regulator cu acţiune integrală (PI, PID poate fi efectuată numai în conformitate cu criteriul simetric (v. tabelul 16.5).

Constante de timp echivalente

Regimul tranzitoriu al sistemelor de reglare, proiectate în conformitate cu criteriul modelului sau criteriul simetric (cu filtrarea mărimii de intrare), poate fi desris prin regimul tranzitoriu al unui circuit integral simplu, de ordinul întîi, cu constanta de timp t_e. Cu privire la întreg sistemul de reglare optimă, t_e este definită ca „constanta de timp echivalentă a sistemului de reglare optimă“ şi depinde de parametrii procesului (v.tabelul 16.6, coloana cea mai din dreapta). La optimizarea proximei bucle, ierarhic suprapuse, sistemul de reglare considerat apare cu această constantă de timp echivalentă considerată ca o „constantă de timp mică“.

Dat fiind volumul limitat al memoratorului, în acesta nu au fost cuprinse datele caracteristice ale instalaţiilor, echipamentelor şi materialelor fabricate în România, în conformitate cu standardele, prescripţiile şi normele corespunzătoare. Acestea fac obiectul îndreptarelor de nivel mediu publicate de Editura tehnică, alcătuind o serie din care au apărut pînă în prezent lucrările:

N. Bădulescu
„Linii şi staţii electrice — îndrumător"

T. Cănescu, R. Dordea, C. Popescu, D. Savopol
„Instalaţii electrice de utilizare — îndreptar"

A. Băilescu, D. Savopol
„Iluminatul electric — îndreptar"

C. Cruceru, L. Morczynski, R. Petrescu
„Conducte electrice — îndreptar"

V. Lică, C. Burdulea
„Materiale electroizolante — îndreptar"

S. Cedighian
"Materiale magnetice — îndreptar"